

Article, Published Version

Morgner, Joachim

Schiffahrtsschleusen mit großen Fallhöhen

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106047>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Morgner, Joachim (1964): Schiffahrtsschleusen mit großen Fallhöhen. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 11. Berlin: Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 197-364.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



DK 626.416 Schleusen zur Überwindung
größerer Höhenunterschiede

Schiffahrtsschleusen mit großen Fallhöhen

Dipl.-Ing. Joachim Morgner

S. 198 - 363 , 43 Qu

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
- 1.1 Allgemeines
- 1.2 Problematik der Schleusungen mit kleinen und großen Gefälle-
unterschieden und Aufgabenstellung für vorliegende Arbeit
2. Bestehende bzw. im Bau befindliche Schleusen mit hohem Gefälle
- 2.1 Deutschland
- 2.2 Österreich
- 2.3 CSSR
- 2.4 Frankreich
- 2.5 Polen
- 2.6 UdSSR
- 2.7 UCA
- 2.8 Zusammenfassung
3. Die Modellschleuse der Forschungsanstalt für Schifffahrt,
Wasser- und Grundbau
- 3.1 Aufbau und Abmessungen
- 3.2 Meßeinrichtungen sowie Automatik für Bedienung und Regi-
strierung der Versuchsergebnisse
4. Ähnlichkeitsbetrachtungen nach der Theorie der Dimensionen
5. Hydrodynamische Vorgänge beim Füllen und Entleeren in der
Schleusenkammer
6. Hydrodynamische Vorgänge in den Vorhäfen beim Füllen und
Entleeren der Schleusenkammer
7. Schlußbetrachtungen

Literaturverzeichnis

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Infolge der starken Entwicklung der Schifffahrt auf den Binnenwasserstraßen und im Interesse einer großen Reisegeschwindigkeit der Schiffe ist man bestrebt, die Zahl der Schleusenstufen weitgehend zu vermindern und damit das Gefälle der Schleusen zu vergrößern, soweit dies bei den Geländeverhältnissen möglich ist. Technische, betriebliche und auch finanzielle Erwägungen führten zu dieser Entwicklung. Eine Schleuse von beispielsweise 12 m Fallhöhe ist nicht nur billiger in Herstellung und Betrieb, sondern bedeutet auch für die Schifffahrt einen geringeren Zeitverlust als eine Schleusentreppe mit zwei Schleusen von je 6 m Fallhöhe. Aus nachfolgender Zusammenstellung einiger westdeutscher Kanäle nach [1] geht die Zunahme des Schleusengefälles sowohl aus den mittleren wie aus den Höchstgefällen hervor:

Kanalstrecke	Erstes Bau- bzw. Be- triebsjahr	Mittleres Schleusengefälle (m)	Höchstes Schleusengefälle (m)	Zahl der Schleusen- stufen
Dortmund-Ems-Kanal (nördl. Abstieg)	1899	~ 3,40	<u>8,50</u>	15
Rhein-Herne-Kanal (im Bergsenkungsgelände)	1914	~ 5,00	7,90	7
Wesel-Datteln-Kanal (im Bergsenkungsgelände)	1928	~ 6,70	9,00	6
Seitenkanal Gleesen-Papenburg (Ems)	seit 1935 im Bau	~ 8,00	<u>10,15</u>	4
Mittelland-Kanal (von DL-Kanal bis Elbe o. Hebewerk Rothensee)	1938	12,00	15,00	2

Bei den unterstrichenen Höchstgefällen handelt es sich um Sparschleusen; solche wurden bisher im allgemeinen bei Gefällen von 6,0 m aufwärts angewendet. Im Bergsenkungsgebiet wird der Bau von Sparschleusen nicht vorgenommen.

In den USA zeigt sich die Tendenz zur Vergrößerung der Fallhöhen im Laufe der Jahre in einem weitaus stärkeren Maße, bedingt durch die Vielzahl der bereits erbauten Schleusenanlagen. Beispiele von Schleusengruppen an bekannten amerikanischen Binnenwasserstraßen vergegenwärtigen deutlich diese Entwicklung [2]:

(1 ft = 0,3048 m)

Wasserstraße	Schleusen Nr.	Erstes Betr.- Jahr	Abmessungen (ft) Breite Länge Gefälle		
<u>Gruppe A-1: Pennsylvania und New York (Wassertiefe 9 ft)</u>					
Allegheny River	(4	1927)	56,0	360	10,5
	(6	1928)			12,2
	(7	1930)			13,1
	(8	1931)			17,9
	(9	1938)			22,0
<u>Gruppe B-5: Alabama (Wassertiefe 9 ft)</u>					
Black Warrior River	(13	1905	52,0	285,5	11,0
	(-	1939	95,0	460,0	30,0
	(14	1910	52,0	282,1	14,0
	(16	1915	52,0	285,0	21,0
	(17	1915	52,0	285,5	72,0
<u>Gruppe C-3: Columbia River, Oregon (Wassertiefe 27 ft)</u>					
Tennmile Lock	-	1915	50,0	265,0	6,0
Fivemile Lock	-	1915	45,0	265,0	10,1
Big Eddy Lock	-	1941	45,0	265,0	45,0
Bonneville Lock	-	1938	76,0	500,0	63,8

Wasserstraße	Schleusen Nr.	Erstes Betr.- Jahr	Abmessungen (ft) Breite Länge Gefälle		
<hr/>					
Gruppe T-1: Tennessee River in Tennessee, Alabama und Kentucky					
<hr/>					
(Wassertiefe 9 ft)					
Hales Bar	-	1913	60,0	265,0	34,0
Chickamauga Lock	-	1937	60,0	360,0	51,0
Watts Bar Lock	-	1941	60,0	360,0	58,0
Pickwick Landing	-	1937	110,0	600,0	55,0
Kentucky Lock	-	1942	110,0	600,0	56,0
Fort Loudoun Lock	-	1943	60,0	360,0	72,0
Wilson Lock:					
O. Schleuse	-	1927	60,0	292,0	91,7
U. Schleuse	-	1927	60,0	300,0	91,7

Im letzten Jahrzehnt wurden in den USA die Mc Nary-Schleuse am Columbia mit einer Fallhöhe von 27,36 m sowie die neue Schleuse an der Wilson-Staumauer mit 30,5 m Hubhöhe fertiggestellt. Die Schleuse "Ice Harbour" am Snake River (USA) wurde Anfang 1962 in Betrieb genommen und besitzt mit 31,4 m den augenblicklich größten Einzelhub der Welt. Gegenwärtig wird am Columbia-Fluß bei der Stauanlage John-Day eine 205 m lange Schleuse mit einer Fallhöhe von 34,5 m errichtet, die somit nach Fertigstellung den bisher höchsten Hub der Welt für sich in Anspruch nehmen kann. Mit 26 m Fallhöhe stellt die Schachtschleuse Donzère-Mondragon in Frankreich, im Rhone-Seitenkanal die z. Z. höchste Schleuse Europas dar. Die Schleuse Stechovice in der CSSR, auf die später noch eingegangen wird, hat eine Fallhöhe von 20 - 22 m.

Deutschland besitzt gegenwärtig die größten Fallhöhen in der Speicherschachtschleuse Anderten mit 15,0 m und in der Speicherschleuse Minden i. W. mit 14,68 m. Bei der Zwillingschachtschleuse Eisenhüttenstadt (früher Fürstenberg/O.) schwankt das Gefälle zwischen 9,07 m und 14,28 m; diese hat somit die größte Fallhöhe eines Schleusenbauwerkes auf dem Gebiet der DDR.

Im Zuge des Ausbaues und Neubaus von Wasserstraßen, Staustufen, Kanalisierung, bedingt durch die Energiegewinnung, die Industrialisierung, durch landwirtschaftliche Be- und Entwässerungsprobleme und den wirtschaftlichen Aufschwung der Länder, ist auch in der DDR und in anderen sozialistischen Ländern die Frage akut geworden, große Gefälleunterschiede des Wasserspiegels möglichst durch ein einzelnes Schleusenbauwerk - das sich zunächst neben anderen Schiffshebeanlagen anbietet - zu überwinden. Bei der vorprojektierten Trasse eines Schiffahrtskanales in der DDR ergab sich an einer Stelle ein Wasserspiegelunterschied von insgesamt rd. 30,0 m. Bei dem Donaukraftwerk Aschach beträgt das max. Gefälle knapp 20 m. Ähnliche Gefälleunterschiede traten bei den anderen geplanten Kraftwerken der Donaustaustufen auf. Z. B. wird am "Eisernen Tor" dann ein Gefälle von ca. 28,0 m zu überbrücken sein.

1.2 Problematik der Schleusen mit kleinen und großen Gefälleunterschieden und Aufgabenstellung für vorliegende Arbeit

Während bei Schleusen mit niedrigen Fallhöhen die Füllung und Leerung durch das Obertor (Hub- oder Klapptor) direkt vorgenommen wird, sind bei mittleren Gefällen Torumläufe, sog. kurze Umläufe oder Torspeisung üblich; u.U. wird auch von Längsumläufen mit Stichkanälen Gebrauch gemacht. Der Füllvorgang vollzieht sich bei den erstgenannten Systemen im wesentlichen unter der Einwirkung von Schwallen, die die Schleusenkammer mehrfach durchlaufen. Der Füllschwall verändert die anfänglich horizontale Wasserspiegellage in der Kammer mit wechselndem Gefälle nach dem Unter- und Oberhaupt und erzeugt dadurch die in ihrer Richtung ebenfalls wechselnden Trossenkräfte. Die Füllöffnungen dürfen daher zu Beginn einer Füllung nur allmählich freigegeben, und die am Anfang vorhandenen großen Druckhöhen können nur geringfügig ausgenutzt werden. Große Füllzeiten und kleinere mittlere Hubgeschwindigkeiten sind daher kennzeichnend für jene Schleusen. Das System mit kurzen Umläufen, das zunächst den Vorteil kürzerer Füllzeiten gegenüber der einfachen Torfüllung mit einer zweckmäßigeren Gestaltung des Oberhauptes verband, hatte bis ca. 1919 im europäischen Schleusenbau eine Art Standardstellung inne. Eine Vielzahl von Einzelnormen zeigen die Bedeutung dieses Systems, jedoch scheint auch damit eine optimale Lösung nie recht gelungen zu sein. Um 1918 gelang der damaligen Preußischen Ver-

suchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau in Berlin mit der Entwicklung des Systems BURKHARDT ein echter Fortschritt. Durch die Anordnung einer querliegenden Trennwand kurz hinter dem Oberdremmel stürzt das Füllwasser zunächst in eine Art Vorbecken und strömt erst dann nach großem Energieverlust und genügender Wasserüberdeckung in die Kammer. Dieses einfache System hat sich voll durchgesetzt und gilt bis in jüngste Zeit als eines der modernsten Füllsysteme, was auch der Bau der Schleusen an den beiden Donaustaufen Jochenstein und Ybbs-Persenbeug beweist. Zahlreiche Veröffentlichungen sind über Schleusen mit kleinen und mittleren Gefällen sowie über ihre Füll- und Entleerungsvorgänge erschienen u. a. in [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], aus denen zu ersehen ist, daß man sich bei der Projektierung einer Schleuse weitgehendst auf die Ergebnisse von Modellversuchen stützt. Die neueren Arbeiten von BURKHARDT, WITTMANN und WICKERT gehen ausführlich auf diese Problematik ein und untermauern z. T. theoretisch die aus Modellversuchen an Schleusen dieser Bauart gewonnenen Resultate. BLEINES [12] betrachtet den Schleusungsvorgang als Schwingungsproblem. Er zieht an Hand aufgestellter Schwingungsanalysen Rückschlüsse auf den Verlauf des Wasserspiegels in der Kammer und vergleicht die daraus entwickelten Schleusencharakteristiken mit Ergebnissen eigener Modellversuche. Das hydrodynamische Verhalten während der Füllung und Leerung bei Schleusen mit Fallhöhen bis ca. 15,0 m und ihre bauliche Gestaltung sind somit im allgemeinen bekannt. Bei neu zu projektierenden Anlagen genügen meistens wenige Modellversuche, um Füll- und Entleerungssystem sowie Ein- und Auslauf den jeweils verschiedenen örtlichen Gegebenheiten anzupassen.

Anders sieht es bei Schleusen mit großen Gefälleunterschieden aus, wobei im folgenden solche mit einer Hubhöhe $H_{ges} \geq 15,0$ m in Betracht gezogen werden sollen. Hier haben bisher als Füll- und Entleerungssysteme der Kammer ausschließlich Längsumläufe mit Stichkanälen oder Grundläufe in verschiedenster Anordnung und Größe Verwendung gefunden. Der Zufluß des Füllwassers verteilt sich somit auf die ganze Kammerlänge. Man hoffte dadurch den Füllschwall auszuschalten und infolge schneller Freigabe des Füllquerschnittes einem dem theoretischen Optimum nahekommenen Kleinstwert an Füllzeit erreichen zu können.

Infolge der im allgemeinen geringeren Stauhöhen hat dieses System in Deutschland nie recht Anklang gefunden. Eine Ausnahme bilden lediglich die großen Sparschleusen, da hier ein anderes System aus konstruktiven Gründen kaum in Frage kommt. Auch muß erwähnt werden, daß die Anordnung von Längsumläufen die Massivbauweise erfordert und die Verwendung von Stahlspundbohlen als tragendes Wandelement ausschließt. Dieses typisch "amerikanische" Füllsystem wurde auf Grund der von Anbeginn an dominierenden Fluß- und Seeschleusen in den USA entwickelt. Mit den Schleusen des Panamakanals war bereits eine Größenordnung vorgegeben, die auch heute nach rd. 50 Jahren als Füllmethode ein langes Umlaufsystem erfordert. Damals entschloß man sich für den Bau eines durchgehenden, unter der Schleusensohle zentral angeordneten Längskanals, wovon seitlich Stichkanäle abzweigen. Der amerikanische Schleusenbau hielt auch in den folgenden Jahren bis zur heutigen Zeit an diesem Grundprinzip fest, variiert wurde lediglich die Lage der Längskanäle. Das Ergebnis dieser steten Entwicklung gipfelt in dem Bau der vor kurzem fertiggestellten, über 30 m hohen Wilson- und Ice-Harbour-Schleuse. Mit der Konstruktion dieser Füll- und Entleerungssysteme wurde weitgehend das technisch-wirtschaftliche Optimum erreicht.

In der einschlägigen Fachliteratur findet man wegen der geringen Anzahl von erbauten europäischen Schleusen mit hohem Gefälle relativ wenige Angaben über jene Bauwerke und ihr hydrodynamisches Verhalten während des Schleusungsvorganges. Erfahrungswerte sind überhaupt nicht zu erwarten; außerdem wurden die modellmäßigen Untersuchungen in einem kleinen Maßstab durchgeführt. Bei den wenigen Anlagen dieser Art sind die Verhältnisse der Wasserzu- und Wasserabführung grundverschieden, was wiederum eine unterschiedliche Ausbildung der Füll- und Entleerungssysteme bedingt. Angeführte Gesichtspunkte gaben Anlaß für diese Arbeit mit dem Ziel, die hydraulischen Untersuchungen mit einem möglichst großen Modell durchzuführen, um dadurch sichere Aussagen für die Natur machen zu können.

An Literaturangaben, die sich speziell mit hohem Gefälleunterschied bei Schleusen bzw. deren Füll- und Entleerungssystemen befassen, standen die Arbeiten von LAUFER [13], WÜSENER [14] und WEHR-SCHÜTZ [25] zur Verfügung, wobei bemerkt werden muß, daß zuletzt genannte Veröffentlichung erst nach Abschluß der Modellversuche

(Abschnitt 5 und 6) greifbar war. LAUFER untersuchte an Hand einer Modellschleuse im Maßstab $\sim 1 : 20$ mit einem für damalige Begriffe großen Höhenunterschied von 16,50 m verschiedene Wasserzuführungsarten in die Schleuse und ermittelte dabei die Auswirkungen auf die Trossenkräfte, Schleusungszeiten etc. Er machte Versuche über den Einlauf des Wassers unter dem Oberdrempe! durch zwei getrennte Leitungen, die Zuführung des Wassers unter dem Oberdrempe! durch ein Beruhigungsbecken, den Einlauf des Wassers durch Torumläufe sowie den Einlauf des Wassers unmittelbar durch ein Hubtor in eine Vorkammer. Das sind Füll- und Entleerungssysteme, die bei großen und größten Fallhöhen nicht angewendet werden können. WÖSSNER untersuchte in [14] das System "Längsumläufe mit Stichkanälen" an einem Modell im Maßstab $1 : 25$ einer Kammerschleuse von 2,80 m Hubhöhe. An Hand der Ergebnisse seiner Modellversuche stellte er Richtlinien auf für das Verhältnis Querschnitt der Stichkanäle F_S zu Querschnitt der Längsumläufe F_L und gab Hinweise für die zweckmäßigste Anordnung der Stichkanäle.

WILHRSCHÜTZ behandelte in seiner Arbeit, ausgehend von der Entwicklung und Einteilung der Schiffssschleusen, die Füll- und Entleerungssysteme bei Flußschleusen mit großen Fallhöhen. Er stellte hierbei vergleichende Betrachtungen verschiedener Füllsysteme an, wobei er den amerikanischen Schleusenbau am St. Lawrence Seaway und Columbia River von den Anfängen bis zur Gegenwart mit den hohen Einzelhub-Schleusen verfolgte und charakteristische Konstruktions- und Schleusungsdaten angab. Neben der Lage und den Größenverhältnissen der eigentlichen Füllöffnungen verschiedener Systeme wurde auch das Problem der Wasserzuführung behandelt sowie auf die Entwicklung geeigneter Verschlüsse hingewiesen, die vor allem der Dauerbeanspruchung gewachsen sein müssen. Die Gefahr des starken Lufteinzuges während des Füllungsvorganges durch etwas zu hoch liegende Einlaßöffnungen und das Auftreten von Kavitationerscheinungen in den Umläufen verschiedener Bauwerke wurde erwähnt. Letzteren kann durch Vergrößerung der Verschußflächen und der Kanalquerschnitte erfolgreich begegnet werden. In ähnlicher Weise wurde über die hohen europäischen Schleusen Bollène der Rhonestufe Donzère-Mondragon (Frankreich) und Aschach (Österreich) berichtet. Abschließend ging der Verfasser auf die Bedeutung der hydraulischen Modellversuche im Schleusenbau ein und berichtete über die durchgeführten Untersu-

chungen am Modell der Nordschleuse des Donaukraftwerkes Aschach.

Sind bei Schleusen mit kleinem Gefälle Modellversuche unumgänglich, dann erst recht bei Anlagen mit großem Gefälleunterschied. Aus diesem Grund wurde ein Schleusenmodell im Maßstab 1 : 20 der Natur mit einem Gefälle von 30,0 m gebaut (siehe Abschnitt 3) und mit drei verschiedenen Varianten von Füll- und Entleerungssystemen versehen, die einzeln nacheinander in Betrieb genommen werden können. Zweck der vorliegenden Arbeit ist es nun, mittels Modellversuchen zu überprüfen, inwieweit die gebräuchlichen hydrodynamischen Ansätze zur Bestimmung der Schleusencharakteristiken, sowie Erfahrungswerte - gewonnen aus Modellversuchen an Schleusen mit kleinerem Gefälle- auch auf Schleusen mit hohem Gefälle zu übertragen sind.

Wie aus dem Angeführten ersichtlich, sind die Probleme recht vielseitig, so daß sich nachfolgende Untersuchungen nur auf die hydrodynamischen Verhältnisse in der Kammer beschränken. Schwall- und Sunkerscheinungen in den Vorhäfen sollen ausführlicher einem besonderen Thema vorbehalten sein. Desgleichen kann das Problem der Wasserersparnis beim Schleusungsvorgang (Sparschleusen), welches bei hohem Gefälleunterschied außerordentliche Bedeutung erlangt, in diesem Rahmen nicht behandelt werden.

Zunächst wird auf konstruktive Gesichtspunkte und hydrodynamische Daten von bestehenden Schleusen mit hohem Gefälle im In- und Ausland eingegangen.

2. Bestehende bzw. im Bau befindliche Schleusen mit hohem Gefälle

2.1 Deutschland

Es werden die wesentlichsten Merkmale von drei Schachtschleusen mit den größten in Deutschland vorkommenden Gefällen, die alle um 15,0 m liegen, behandelt [15], [16]. Ausführliche Angaben und nähere konstruktive Beschreibungen dieser Bauwerke sind den zahlreichen Veröffentlichungen der Fachliteratur zu entnehmen.

2.11 Speicherschachtschleuse Minden i.W.

Die bedeutendste Anlage vor dem ersten Weltkrieg war die im Jahre 1915 dem Verkehr übergebene Schachtschleuse Minden i.W. mit den Kammerabmessungen $B = 10 \text{ m}$ und $L = 85 \text{ m}$. Sie ermöglicht den

Abstieg vom Mittellandkanal zur Weser und besitzt eine maximale Fallhöhe von 14,68 m. Die Notwendigkeit der Wasserersparnis einerseits und der Platzmangel zur Anordnung offener Sparbecken andererseits haben hier zu der Lösung geführt, 16 Wasserspeicher in vier Stockwerken in den verbreiterten Schleusenmauern unterzubringen, wodurch sich eine Wasserersparnis von 71,4 % ergibt (Abb. 1). Seinerzeit angestellte Untersuchungen, 5 Stockwerke mit 20 Kammern anzuordnen, die eine Wasserersparnis von 75 % ergeben hätten, lieferten kein befriedigendes Ergebnis, weil die verminderte Geschoßhöhe, die Bauart der Ventile sehr erschwert hätte. Die Ventiltrichter der Sparkammern gehen möglichst tief nach unten, damit die ausströmenden Wassermassen keine Luft mitreißen. Bei dieser Schleuse sind Ringventile eingebaut worden; die Bedienung der Wasserkammern erfolgt mittels niedrig gehaltener gußeiserner Zylinderschützen. Jede Sparkammer hat für den Fall eines Ventilbruches einen Überlauf nahezu in Schleusenmitte erhalten. Außerdem wurden die Treppenläufe jeder Sparkammer-gruppe den Überlaufschächten angegliedert und somit zur Wasserabführung herangezogen. Die Verbindung zwischen Sparbecken und Schleusenkammer erfolgt über Längsumläufe mit Stichkanälen, wobei ein Umlaufquerschnitt gleich $5,22 \text{ m}^2$ und der daran angeschlossene Querschnitt der Stichkanäle $11,0 \text{ m}^2$ betragen. Maximaler Zufluß und Schleusungszeiten entsprechend den für damalige Zeiten gebräuchlichen Daten. Das Oberhaupt ist mit einem Klapptor, das Unterhaupt mit einem Hubtor ausgerüstet.

2.12 Speicherschachtschleuse Anderten

Die Bauweise der Mindener Schachtschleuse ist Vorbild für die im Jahre 1928 in Betrieb genommene Doppelschachtschleuse Anderten gewesen (Abb. 2). Sie vermittelt den Aufstieg zur Scheitelhaltung des Mittellandkanals östlich von Hannover und ist mit zwei Kammern von je 225 m Länge und 12 m Breite bei einer Fallhöhe von rd. 15 m heute noch eine der größten Kanalschleusen der Welt. Bei ihr sind die Schleusenmauern entsprechend ihrer Länge in fünf je 42,3 m lange Blöcke unterteilt, so daß sich bei fünf Stockwerken $2 \times 25 = 50$ Speicher je Kammer ergeben. Sie ermöglichen eine Wasserersparnis von 75 %. Die gesamten Sparräume eines Stockwerkes haben eine Grundfläche gleich dem 2,1-fachen der Kammerfläche. Gegenüber

Minden i.W. ist eine grundsätzliche Änderung insofern getroffen worden, als in Anderten die Überläufe der Becken an besondere Kanäle anschließen, die ins Unterwasser münden. Diese sind so bemessen, daß sie, selbst wenn gleichzeitig zwei der untersten Ventile bei offenem Obertor brechen sollten, der dann unter hohem Druck einströmende große Zufluß von rd. $55 \text{ m}^3/\text{s}$ ohne Rückstau abgeführt werden kann. Da die Ausspiegelung zwischen der Schleusenkammer und den Sparbecken bei $0,15 \text{ m}$ Restgefälle unterbrochen wird, ist die Zeit für das Füllen bzw. Leeren einer Sparbeckenstufe auf 75 Sek. einschließlich $2 \times 10 \text{ Sek.}$ für die Ventilbewegungen beschränkt worden. Der Ausgleich der letzten rd. $3,8 \text{ m}$ Fallhöhe zu den anschließenden Kanalstrecken erfolgt mittels eines Abflusses von $40 \text{ m}^3/\text{s}$, um zu starke, der Schifffahrt gefährliche Wellenbewegungen in den Haltungen zu verhüten. Beide Schleusen besitzen, wie es durch die Anordnung der Speicher bedingt ist, Längsumläufe mit Stichkanälen auf der gesamten Kammerlänge. Die Umlaufquerschnitte und die gleichgroßen Durchflußquerschnitte der Umlaufschützen sind so bemessen, daß sich die Wasserstände in ca. 5,5 Minuten ausspiegeln. Dabei werden die Umlaufverschlüsse in drei Teilhuben geöffnet. Die gesamte Füll- bzw. Leerzeit bis zu einem Restgefälle von $0,15 \text{ m}$, gegen welche das Tor geöffnet werden kann, beträgt rd. 12 Min., die durchschnittliche Hubgeschwindigkeit beträgt somit $\frac{15,0}{12} = 1,25 \text{ m/min} = \text{rd. } 2 \text{ cm/s}$.

Das Oberhaupt der Doppelspeicher-Schachtschleuse Anderten ist zugunsten der in den Kammermauern liegenden Wasserspeicher mit einer Länge von 19 m sehr kurz gehalten. Seine Rückfläche ist abgeschrägt. Aus Modellversuchen ermittelte man die günstigste Form der Umläufe. Es wurde danach der Einlauf in die Tornischenschleife verlegt und der Schacht senkrecht bis zur Tiefe der Kamerschleife hinabgeführt, wo er sich in die beiden Umläufe teilt. Als Verschlüsse dienen Rollkeilschützen. Sie haben eine freie Durchflußfläche von $5,8 \text{ m}^2$, welche schon vor den Notschützenschächten mit einem kreisförmigen Querschnitt von $2,62 \text{ m}$ Durchmesser in eine Trapezform mit gewölbter Decke ohne Einschnürung übergeht. Der gesamte an einen Umlauf angeschlossene Stichkanalquerschnitt beträgt $20,0 \text{ m}^2$.

Die Unterhäupter haben eingespannte Sohlen erhalten, da bei Anordnung von Sohlenfugen die erforderliche Wasserdichtigkeit des Drem-

pels nicht gewährleistet ist. Die Drempeltiefe beträgt 3 m.

Die Oberhäupter der Doppelschleuse Anderten besitzen Klapptore, die Unterhäupter Hubtore, die als Riegeltore mit nach Unterwasser zu liegender Torhaut ausgebildet sind. Die in gleichen Abständen angeordneten Hauptriegel sind nach dem Vorbild des Untertores der Schachtschleuse Minden durch Zwischenriegel unterteilt. Jedes Hubtor hat vier Führungsrollen, von denen nur die beiden unteren Spurkränze tragen.

2.13 Zwillingschachtschleuse Eisenhüttenstadt/Oder

Von den Kanalschleusen, die im Bereich der märkischen Wasserstraßen mit der Vollendung des Mittellandkanals als Ersatzbauwerke erforderlich geworden sind, verdient die Schachtschleuse Eisenhüttenstadt/O. mit einem Gefälle zwischen 9,07 m und 14,28 m Beachtung. Sie ermöglicht den Abstieg vom Oder-Spree-Kanal zur Oder und wurde in den Jahren 1925 - 1929 für das Passieren von Schiffen bis zu 1 000 t gebaut. Das Gesamtbauwerk ist in fünf Teile aufgelöst; in die beiden getrennt gegründeten Kammern, in die beiden durch eine Fuge getrennten Unterhäupter und in das gemeinsame, auf durchgehender Sohle stehende Oberhaupt (Abb. 3 und 4). Diese Zusammenfassung der Oberhäupter ergab sich infolge der in ihnen liegenden Kanäle mit ihren Verschlüßvorrichtungen zum Verbinden der zwei Schleusenammern. Den Wänden der 12 m breiten Kammern wurde infolge der großen Fallhöhe eine Neigung von 100 : 1 gegeben. Jede Kammer besitzt eine Länge von 130 m .

Die Oberhäupter haben Klapptore von 30 t Gewicht. Vor jedem Klapptor befindet sich eine 3 m tief in den Drempel eingelassene Rinne, von der aus das Wasser nach den beiderseits abzweigenden Umlaufkanälen läuft. Mit einem Querschnitt von $7,0 \text{ m}^2$ sind diese so durch das Mauerwerk des Drempels geführt, daß sie von oben her mitten in die Decke des Drempelhohlraumes münden, von wo aus das Wasser in die Schleuse tritt. Hier enden auch die drei Verbindungskanäle, die zum Wasserausgleich beim Zwillingsbetrieb dienen. Zwei von ihnen werden durch Ringventile, der dritte durch einen Walzenschieber abgeschlossen. Die Verschlüsse liegen in einem in der Mittelmauer zwischen den Oberhäuptern ausgesparten Raum, durch den die Kanäle mittels stählerner Rohre hindurchlaufen. Für jeden der drei Schieber sind zu beiden Seiten Notschieber vorgesehen.

Die Unterhäupter besitzen Hubtore von 130 t Gewicht. Diese sind als Riegeltore ausgebildet und im unteren Teil mit vier Segmentschützen versehen (Abb. 4), mit deren Hilfe der Schleusenbetrieb auch dann noch aufrechterhalten werden kann, wenn die Entleerungskanäle aus irgendwelchen Gründen ausfallen. Die Dichtung des Tores bewirken Holzbalken, die sich gegen Anschlagrahmen aus Gußeisen mit darüber befindlichen Leisten aus Flußstahl legen. Jedes Tor hat 4 Laufrollen; sie sind so abgefedert, daß sich das Tor bei einem Wasserüberdruck von 0,5 m bereits von den Dichtungsleisten abhebt. Schleusungszeiten und Zuflüsse liegen auch hier in den üblichen Grenzen, entsprechend der Zeit, wo die Projektierung stattfand. Als Festmachevorrichtungen für die Schiffe in der Kammer wurden Schwimmpoller angeordnet.

Außerordentlich ist bei diesem Bauwerk die starke Massierung von Beton am Oberhaupt, ferner, daß sich der Drämpelabfall erst etwa 10 m hinter dem Klapptor befindet, während man sonst bestrebt ist, den Drämpelabfall möglichst dicht hinter dem Klapptor beginnen zu lassen, um an Kammerlänge zu sparen (Abb. 3).

2.2 Österreich - Die Donauschleuse Aschach

Die Donau-Staustufe Aschach besteht aus der Wehranlage, dem Kraftwerk und einer Doppelschleuse [25], [37]. Das Kraftwerk ist bezüglich der installierten Leistung mit 263 MW und seiner Jahresarbeit das größte an der österreichischen Donau. Beim Ausbau der sonst nutzbaren Wasserkraft in Österreich steht Aschach auch an erster Stelle; Grund hierfür sind die reiche Wasserführung und die Gefälleverhältnisse des Donauflusses.

Die erste Schleuse wurde im Jahre 1962 und die zweite 1963 fertiggestellt; ihre Abmessungen betragen 24 m x 230 m (Ausbaugröße für 1 500 t-Schiffe). Die Schleusenanlage mußte aus schiffahrtstechnischen Gründen in bezug auf den Füllvorgang gegenüber den Schleusen der vorher erbauten Donau Stufen Jochenstein (max. H \approx 12 m) und Ybbs-Persenbeug (max. H = 12,95 m) abgeändert werden. Bei den genannten Anlagen wird die Kammer durch Anheben des oberwasserseitig angeordneten Hub-Senktores gefüllt. Die Entleerung erfolgt mittels eingebauter Schützen im unterwasserseitigen Stemmtor. Die Füllmenge beträgt 60 000 bis 80 000 m³ und die Füll- und Entleerungszeit ca. 15 Minuten. Sowohl beim Füllen als auch beim Entleeren treten im Ober- und Unterhafen störende Sunk- bzw. Schwallerscheinungen

auf, die sich in Aschach bei einer Füllwassermenge zwischen 90 000 und 120 000 m³ in noch stärkerem Maße bemerkbar machen würden. Außerdem ist hier die Fallhöhe um rd. 5 m höher als bei den Schleusen Jochenstein und Ybbs. Diese Umstände zwangen bei der Schleuse Aschach einmal zur Entnahme des Füllwassers direkt aus der Stauhaltung; bei der Entleerung wird das Wasser gleichfalls in der Nähe des Untertores unmittelbar dem Stromlauf zugeführt. Die Füll- und Entleerungsbauwerke sind in der an den Donaustrom angrenzenden Schleusenmauer angeordnet. Zum anderen strömt das Wasser hier durch zwei Kanäle unter der Kammersohle ein (Grundläufe) und verteilt sich leicht über die gesamte Länge der Sohle, da diese regelmäßig mit Schlitzfenstern versehen ist. Die Entleerung erfolgt durch die gleichen Kanäle. Die Aufteilung der Füllöffnungen wurde weniger auf Grund hydraulischer Erwägungen vorgenommen, sondern entsprach mehr dem Bedürfnis nach einer einheitlichen Ausbildung der Schleusensohle, zumal diese mittels Fertigbetonteilen ausgeführt werden sollte. Die Folge dieser sehr großen Gesamtoberfläche ist, daß die Schleusenfüllung zwar optisch ruhig erscheint, mehr oder weniger ausgeprägte Längsbewegungen jedoch unvermeidbar sind. Die Füll- und Entleerungszeit beträgt 13 bis 15 Minuten.

Wie bei Jochenstein und Ybbs werden die Schleusen auch zur Hochwasserabfuhr mit herangezogen, wobei sie 28 % der ankommenden Hochwasserabflüsse durchlassen können. Dadurch sparte man den Bau von 1 bis 2 Wehrfeldern ein, deren bauliche Einordnung bei der Stufe Aschach infolge der Talenge unmöglich gewesen wäre.

Das Obertor jeder Schleuse wurde als Stenmtor, das Untertor gleichfalls als Stenmtor ausgebildet, wobei die letzteren vollkommen geschweißt sind. Als Notverschlüsse dienen bei der Nord- und Südschleuse Dammbalken.

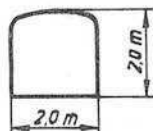
Der obere Vorhafen hat eine Länge von 250 m, der untere 230 m. Die Breite beträgt 100 m.

2.5 CCSR - Die Schleuse Stechovice

Die Stauanlage Stechovice stellt einen Teil der Moldau-Kaskade dar und wurde in den Jahren 1939 - 45 gebaut [17]. Sie besteht aus einer Talsperre, einer Schleuse und einem Mitteldruck-Kraftwerk, dem noch ein Pumpspeicherkraftwerk angegliedert ist. Die

Fallhöhe von Stechovice beträgt ca. 20 - 22 m . Das Einzugsgebiet für die Sperre liegt bei rd. 13 300 km². Auf der Mauerkrone sind in 5 Feldern mit 20 m lichter Weite Stoney-Schützen aufgesetzt, die 5,20 m hoch sind.

Die Schleuse rechts neben der Sperre ist für 1 000 t-Schiffe dimensioniert [32]. Die nutzbare Länge der Kammer beträgt 118,4 m , die Breite 12 m . Durch einen Mitteldrömpel lassen sich zwei kleine Kammern von 85 m und 40 m Länge herstellen. Das Oberhaupt besitzt ein Stemmtor mit einer Höhe von 8 m über dem Drömpel. Jeder der beiden Flügel hat eine Breite von 7,5 m und läßt sich in 60 Sekunden öffnen oder schließen. Im Unter- und Mittelhaupt sind 25 m hohe Stemmtore angeordnet, die sich in 90 Sekunden öffnen bzw. schließen lassen. Als Füll- und Entleerungssystem dienen beiderseitige Längsumläufe mit Stichkanälen, erste-
re haben einen Querschnitt 2,0 m x 2,0 m und sind oben abgerundet. Als Verschlussorgane werden Rollkeilschütze verwendet mit einer Hubgeschwindigkeit von 38 cm/min beim Öffnen und 135 cm/min beim Schließen. Die Stichkanäle (Querschnitt 0,80 m x 0,80 m) haben untereinander einen Abstand von rd. 4,0 m und liegen gegenüber. Die beiden Längsumläufe besitzen je eine Einlauföffnung seitlich vor dem Oberhaupt und sind hinter dem Unterhaupt um 15,0 m verlängert worden. Hier beträgt die Fließgeschwindigkeit an den beiderseitig angeordneten 13 Stichkanälen weniger als 1,0 m/s, womit schiffahrtsgefährdende Strömungen ausgeschaltet wurden. Die gesamte Kammer ist mit Granitsteinen ausgekleidet.



2.4 Frankreich

2.41 Schachtschleuse Donzère-Mondragon

Mit 26 m Hubhöhe stellt die Schleuse Saint Pierre der Rhône-Staumstufe Donzère-Mondragon die z. Z. höchste Schleuse Europas dar, welche sich in einem Seitenkanal der Rhône-Kanalisation in der Nähe der Ortschaft Bollène befindet [18], [19], [20]. Sie wurde in den Jahren 1952 - 1954 erbaut. Der Ausbau der Rhône erfolgt nach dem Gesichtspunkt der Wasserkraftnutzung, der Schiffbarmachung und der Bewässerung. Der Plan zur Ausnutzung der 350 m

Gefällehöhe zwischen Mittelmeer und Genfer See sieht den Bau von 24 Staustufen mit insgesamt 2,62 Mio KVA und 23 Schleusen vor. Ein Abschnitt in diesem Unternehmen ist die Regelung der Gefällestrecke Donzère-Mondragon, 40 km nördlich Avignon, und zwar geschieht dies hier durch den Bau eines Seitenkanals, wobei die Schleuse neben das Krafthaus zu liegen kommt (Abb. 5).

Die Nutzlänge der Schachtschleuse, dieser sog. 3. Rhôneschleuse, beträgt 195,0 m, ihre Breite 12,0 m (Abb. 6). Die auf der Rhône verkehrenden Schlepper können nicht mitgeschleust werden, so daß der Schleusendienst durch kleine Schlepper und Spills ausgeführt wird. Lediglich Schleppzüge, bestehend aus zwei Rhône-Schiffen von 74 m x 8 m oder von 88 m x 11 m können in die Kammer aufgenommen werden.

Interessant sind die Torkonstruktionen. Das Obertor ist ein Senktor und bei hochliegendem Drempel kreisförmig in einem Winkel von 136° gewölbt; es wird somit nur auf Druck beansprucht. Das Untertor ist ein im Grundriß halbkreisförmiges Hubtor mit einem Öffnungswinkel von 189° . Zur Freigabe der Durchfahrt gleitet es hinter der Stirnwand hoch. Sein Gewicht von 160 t wird durch Gegengewichte ausgeglichen. Das Tor besteht aus Halbkreisriegeln, die hier nur auf Zug beansprucht werden. Gefederte Laufrollen und Schienen leiten den Wasserdruck, der max. 187 t/m betragen kann, in das Widerlager. Als Notverschlüsse sind Stemmtore eingebaut, von denen das obere Torpaar gleichzeitig als Nottor gedacht ist. Je nach den Erfordernissen und der Verkehrsentwicklung ist der Einbau eines Mittelttores vorgesehen, das die Kammer in zwei gleichlange Abschnitte teilt (Abb. 6).

Die große Hubhöhe stellte hier besondere Anforderungen an die Füll- und Entleerungseinrichtungen (Abb. 7). Damit den Vorhäfen kein Wasser zugeleitet oder entnommen wird, so daß die Schiffe völlig ungestört an ihren Liegeplätzen warten können, werden etwa $50\,000\text{ m}^3$ Füllwasser seitlich dem Kraftwerkskanal entnommen und symmetrisch den beiden Kammerhälften - wegen des geplanten Mittelttores - in Längskanälen unter der Sohle zugeführt. Die Speisung der Kammer geschieht über acht Stichkanäle in jeder Hälfte, die nochmals durch eine Platte mit kreisrunden geneigten Stichkanälen von 50 cm Durchmesser abgedeckt sind. Das Wasserpelster über diesen

Füllöffnungen in einer Stärke von mindestens 3,0 m läßt nur ganz geringfügige, nicht störende Wirbel bei Beginn der Füllung zu, die außerdem so verlaufen, daß eine selbsttätige Zentrierung des Schiffes in der Kammer erfolgt (Abb. 8). Die Entleerungskanäle sind im Querschnitt etwas größer als die Füllkanäle, um das Leeren zu beschleunigen. Das Kammerwasser wird durch Umschalten der Schütze dem Entlasters des Kraftwerkskanals zugeführt. Während des Füllvorganges steigt der Kammerwasserspiegel mit einer mittleren Geschwindigkeit von 1,6 m/min, bei einem größten Zufluß von etwa $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Er fällt bei der Entleerung mit 2,3 m/min, das entspricht einer Gesamtzeit für ein Schleusenspiel, bestehend aus Heben und Senken, von 27 Minuten. Diese Steig- und Senkgeschwindigkeiten erfordern ein schnelles Umlegen der Trossen, wozu schwimmende Haltekreuze eingebaut wurden, ähnlich denen an der Zwillingschachtschleuse Eisenhüttenstadt/O. Die Schleuse wird zentral bedient.

Zwar wäre man in der Lage - wie WICKERT in [20] schreibt - noch weit schneller zu füllen und zu entleeren (im Mittel 3,0 m/min); dabei wurden größte Schiffskräfte von 1,2 t gemessen. Aus Sicherheitsgründen begnügte man sich aber bisher mit dem erwähnten langsameren Hub. In der neueren Literaturangabe [25] gibt WEHRSCHÜTZ für die Bollène-Schleuse bedeutend niedrigere Füll- und Entleerungszeiten und damit höhere Steigegeschwindigkeiten und Zuflüsse als vorher genannt an (siehe Tabelle der Abb. 22). Diese Angaben beruhen höchstwahrscheinlich auf der Forderung einer schnelleren Abfertigung an der Schleuse, bedingt durch den heutzutage starken Zuwachs der Schifffahrt auf der Rhone.

2.42 Die Rhône-Stufe Montélimar

Nach Inbetriebnahme der ersten großen Staustufe der Rhône zwischen Lyon und der Mündung, der Stufe Donzère-Mondragon, wurde die 2. Stufe, Montélimar gebaut [38]. Die installierte Leistung ist wie bei Donzère-Mondragon 300 000 kW. Die Fallhöhe beträgt bei Niedrigwasser max. 19,2 m . Der Ausbau umfaßte neben einem Stauwehr in der Rhône, Seitendämme zur Einfassung des Stauraumes, einem 12 km langen Zuleitungskanal und einem 2 km langen Auslaufkanal sowie einem Kraftwerk auch eine Schleuse, die sog. 4. Rhône-schleuse.

Zur Rhône-Seite hin liegt die Schleuse neben dem Kraftwerk, wobei das Unterhaupt mit den Turbinen in einer Flucht liegt. Die Schleuse ist 195 m lang und 12 m breit und entspricht auch sonst der von Donzère-Mondragon. Die Tore sind halbzylindrische Hubtore, die sich bewährt haben. Das Wasser zur Schleusenfüllung wird dem Kraftwerksoberrwasser entnommen; die Entleerung erfolgt durch Auslaufkanäle, die von der Mitte der Schleuse her kommend unter dem Kraftwerkseintaster hindurchführen. Die Stirnwand der Schleuse oberhalb des Untertores wurde in Stahl ausgeführt, um Rißbildungen - die sich bei den Bewegungen der Schleusenmauern gezeigt haben - auszuschalten.

2.5 Polen - Oberschleuse Fürstenau (jetziger polnischer Name nicht bekannt)

Diese kleine Schachtschleuse, kurz vor dem 1. Weltkrieg erbaut, ist 45 m lang und 7,5 m breit. Sie überwindet ein Wasserspiegelgefälle von 17,2 m im Masurischen Kanal, der die Verbindung zwischen dem Fluß Alle und dem Mauersee herstellt. Zur Zeit ist die Schleuse wegen der Grenzlage außer Betrieb.

2.6 UdSSR

2.61 Doppelschleusen Wolgograd (früher Stalingrad)

Seit Ende 1960 läuft das Wasserkraftwerk Wolgograd auf Vollbetrieb. Mit einer installierten Leistung von 2 563 MW ist es das z. Z. größte Kraftwerk der Welt [39,7]. Neben dem Kraftwerk und dem Wehr sind auch zwei Doppelschleusen ohne Zwischenhaltung - und zwar am linken Wolgaufer - angeordnet, die 1959 gebaut wurden. Die Abmessungen betragen 290 m x 30 m je Kammer. Die Doppelschleusen mit je rd. 13,5 m Hubhöhe sind mit Sternmotoren im Ober- und Unterhaupt ausgerüstet. Sie gestatten den Verkehr auch der größten Wolkaschiffe, z. B. eines 12 000 t-Tankers. Das Füllen und Entleeren geschieht durch je zwei Öffnungen in den Häuptionern, die mit einem Grundlauf verbunden sind und mittels dem das Wasser durch 16 cm breite Querschlitz in der Sohle in die Kammer gelangt. Zu erwähnen ist noch, daß die Schleusenkammern aus stark bewehrten, schanken Schwergewichtsmauern bestehen, deren Mauerfüße bis zur Kammermitte vorgezogen sind. Der geräumige Vorhafen der Schleusenanlage ist durch zwei lange Molen gegen das offene Meer des Staubeckens abgegrenzt. Er bietet den Schiffen Schutz bei hohem Wellengang und besitzt eine ca. 500 m lange Anlege- und Umschlagstelle.

2.62 Doppelschleusen Kuibyschew

Das Wasserkraftwerk "Lenin" in der Wolga bei Kuibyschew ist mit einer installierten Leistung von 2 300 MW die augenblicklich zweitgrößte Wasserkraftanlage der Welt. U. a. sind hier auch zwei Doppelschleusen mit einer Zwischenhaltung (Schleusentreppe) angeordnet, die im Jahre 1958 erbaut wurden. Jede Kammer ist 290 m lang und 30 m breit. Das max. Wasserspiegelgefälle beträgt rd. 15,0 m je Doppelschleuse. Das Füllen und Entleeren der Kammern erfolgt über Grundläufe, die mittels Schützen verschlossen werden

können. Die Kammern wurden aus stark bewehrten, schlanken Scherengewichtsmauern gebaut und dienten in ihrer Ausführung den vorher beschriebenen Wolgograd-Schleusen als Vorbild.

2.7 U S A

2.71 Die Schleusen im Tennessee Tal

Am Tennessee River befinden sich 11 Schleusen, 10 davon haben eine max. Fallhöhe von 39 ft bis 80 ft, also bis ca. 26,0 m [21]. Alle diese Anlagen besitzen den "conventional type" (Abb. 9). Zwei sich auf die ganze Länge der massiven Schleusenwände erstreckende, geschlossene Zuführungskanäle entnehmen das Füllwasser durch strömungstechnisch günstig ausgebildete Entnahmeöffnungen unmittelbar dem oberen Vorhafen und speisen über eine Vielzahl kleiner Stichkanäle die Kammer. Der Abschluß zur oberen Haltung für das Füllen erfolgt im allgemeinen durch Segmentverschlüsse und zur unteren Haltung für das Entleeren durch Schütze. Die Öffnungszeiten für die Umlaufverschlüsse der Schleusen Fort Loudoun und Watts Bar liegen bei 3 bis 4 Minuten. Abmessungen einiger Tennessee Schleusen sind der Tabelle in Abschnitt 1 zu entnehmen.

In den Vereinigten Staaten von Amerika hat diese Füllart bei Schleusen großer Abmessungen und Hubhöhen ihre Leistungsfähigkeit erwiesen, was vor allem auf jahrzehntelange systematische Modelluntersuchungen am Hydraulischen Laboratorium der Universität Iowa in Iowa City sowie am Hydraulischen Laboratorium der "Tennessee Valley Authority" (TVA) in Knoxville zurückzuführen ist.

Auf die neuerbaute Wilson-Schleuse mit einem Hub von 30,5 m wird im Abschnitt 2.74 eingegangen.

2.72 Die Bonneville-Schleuse

Im Jahre 1938 wurde in Oregon am Columbia River die Bonneville-Schleuse in Betrieb genommen. Die Kammer ist 76 ft breit und 500 ft lang; das max. Gefälle beträgt 66 ft, d.s. 22 m [21]. Die Anordnung des Füll- und Entleerungssystems ist aus Abb. 10 ersichtlich. Ein doppelter Einlauf rechts der Kammerwand bringt das Wasser mittels eines Umlaufes bis unter die Schleusensole längs der Kammerachse. Davon zweigen beiderseitig 14 Stichkanäle

ab. Jeder besitzt drei vertikale Öffnungen - zwei am Rande und eine Öffnung in der Mitte -, wodurch das Wasser in den $14 \times 3 = 42$ Öffnungen senkrecht nach oben in die Kammer einströmen kann; ein Wasserpolster von 26 ft Höhe liegt dabei über den Auslaßöffnungen. Die Entleerung erfolgt durch das gleiche hydraulische System. Der einzelne Längskanal unter der Sohle teilt sich am Unterhaupt in zwei kleinere Torumläufe, die beiderseitig in fünf vertikalen Ausflußöffnungen von der Sohle aus unterhalb des Stemmtores münden. Den beiderseitigen Abschluß bilden bei dieser Anlage Segmentschützen in der üblichen Anordnung mit einer Verschußfläche von $2,13 \times 3,51$ m. Die Füll- und Entleerungszeiten dauern 12 Minuten. Das Oberhaupt wird ebenfalls durch ein Stemmtor abgeschlossen.

Trotz eingehender Modelluntersuchungen während der Projektierung der Bonneville-Schleuse konnte ein Mißerfolg kurz nach Inbetriebnahme der Anlage nicht vermieden werden. Dieser geht letzten Endes auf den starken Lufteinzuf infolge der etwas zu hoch liegenden Einlässe und der beiden Schützenschächte zurück. Die mitgerissene Luft entweicht durch die Füllöffnungen und verursacht so eine nicht mehr zulässige Erhöhung der Füllturbulenz. Zwecks Herabsetzung des Lufteinzuges auf ein erträgliches Maß mußte die vorgesehene Hubzeit der Schützen beträchtlich verlängert werden, was im vorliegenden Fall nur durch ein etappenweises Öffnen möglich war. Diese Betriebsweise, die eine Unstetigkeit in der Schleusenfüllung verursacht und aus diesem Grund vermieden werden soll, hatte bei einer Hubhöhe von nur 17,7 m eine Verlängerung der Füllzeit von 11,5 auf 15,0 Minuten zur Folge.

2.73 Die Mc Nary-Schleuse

Am Columbia River zwischen den Staaten Oregon und Washington wurde in den Jahren 1947 - 1950 die Staustufe Mc Nary erbaut. Sie soll der Schifffahrt den Weg über die etwa 28 m hohen Stromschnellen von Umatilla ermöglichen [22], [23]. Mit dieser örtlichen Kanalisierung wurde der Bau eines Kraftwerkes verbunden, in dem zunächst 14 Kaplanturbinen für eine Schluckfähigkeit von insgesamt $2240 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Leistung von 70 000 KW Aufstellung fanden. Die Stauregulierung erfolgt durch ein Schützenwehr von rd. 402 m Länge, das in 12 Schützöffnungen von je 33,50 m Lichtweite

unterteilt ist. Diese vermögen einen Hochwasserabfluß von $61\,600\text{ m}^3/\text{s}$ durchzulassen (Abb. 11).

Als Auf- und Abstiegbauwerk für die Schifffahrt dient eine Schachtschleuse von 205,7 m Nutzlänge und 26,2 m Kammerbreite. Mit einer max. Fallhöhe von rd. 28 m stellt sie eine der höchsten Schleusen der Welt dar (Abb. 12). Die Wahl der richtigen Betriebsweise hinsichtlich Füllens und Leerens der Kammer ist durch Modellversuche bestimmt worden mit dem Ziel, einerseits den Schleusenvorgang möglichst abzukürzen, andererseits keine gefährlichen Trossenbeanspruchungen zu erhalten. Dieses erscheint umso verständlicher, als man sich nach dem Fehlschlag der Bonneville-Schleuse beim Entwurf der folgenden Stufe, der Mc Nary-Schleuse, sehr ausführlich mit dem Problem der Wasserzuführung und der Entwicklung geeigneter Verschlüsse, die vor allem der Dauerbeanspruchung gewachsen sein müssen, befaßte. Das Ergebnis bestand zunächst in einer durchgehenden Vergrößerung der Längskanäle und der Verschußflächen auf $3,36\text{ m} \times 3,66\text{ m}$. Bedeutsamer noch erscheint die Drehung der Segmentschützen um 180° , wodurch die einzelnen Konstruktionsteile nicht mehr auf Druck, sondern auf Zug beansprucht werden. Diese Lage bewährte sich vor allem in bezug auf die Schwingungserscheinungen, die wiederum im Hinblick auf den ständigen Betrieb nicht hoch genug in Rechnung gestellt werden können und verminderte darüber hinaus sehr merklich die erforderlichen Hubkräfte.

Jede Kammerfüllung erfordert über $150\,000\text{ m}^3$ Wasser, die der Kraftnutzung verloren gehen. Vier mit Leitwänden versehene Einläufe entnehmen die Schleusenwassermenge dem oberen Vorhafen. Über Längsumläufe in den beiden Seitenwänden wird das Wasser den 14 Stichkanälen, je 7 an jeder Seite, im mittleren Drittel der Schleusenlänge von der Sohle aus der Kammer zugeleitet. Alle Stichkanäle vermindern ihren Querschnitt mit der Entfernung vom Längsumlauf (Abb. 13). Die max. Fließgeschwindigkeit in den Vorhafen ist dabei mit $0,3\text{ m/s}$ festgelegt. Die Entleerung erfolgt durch die nach dem Unterwasser weitergeführten Längskanäle mit Hilfe der zur Füllung dienenden Querkäle, wobei unterhalb des Untertores wiederum gegenüberliegend angeordnete Grundauslässe das Wasser von der Sohle aus verwirbeln.

Als Verschlüsse des Ober- und Unterhauptes dienen Stemmtore, die Stauwandflächen beider Torflügel wurden fischbauchförmig gekrümmt ausgeführt. Der Stemmdruck wird so gezwungen, durch einen bestimmten Punkt hindurchzugehen (Abb. 14). Die Höhe des Untertores beträgt 32 m; seine Bewegung vollzieht sich in 1,5 Minuten.

2.74. Die neue Wilson-Schleuse

An der Wilson-Staumauer im Tennessee wurde im Frühjahr 1960 eine Schleuse mit dem z. Z. zweitgrößten Hub der Welt von 30,5 m Höhe fertiggestellt [24]. Dort befinden sich u. a. die Stromschnellen von Muscle Shoals und Colbert, die im Fluß auf 43 km Länge rd. 30 m Fallhöhe verursachen. Im Juli 1956 wurde mit den Arbeiten an der 183 m langen und 33,5 m breiten neuen Schleuse begonnen. Die Gesamtkosten betrugen ca. 35 Mio. Dollar.

Schon 1836 und 1890 sind zur Umgehung der Stromschnellen zwei Kanäle gebaut worden, die je bis zu 17 Schleusen aufweisen. In den Jahren 1925 und 1927 wurde dann mit der Wilson-Staumauer und einer aus zwei Einzelschleusen von je 13,72 m Hub bestehenden Kuppelschleuse ein Zustand geschaffen, der bis in die jüngste Vergangenheit ausreichend war. Unterhalb schließt sich der 4,4 km lange Florence-Kanal an, der an seinem unteren Ende eine dritte Schleuse mit einer Hubhöhe von 3,05 m besitzt. Diese drei Schleusen sind etwa 90 m lang und 18,3 m breit und erfordern meistens eine Zeit von 6 bis 12 Std. zum Durchschleusen, das ist etwa das sechsfache der Zeit an den modernen Kentucky- oder Pickwick-Schleusen am Tennessee. Außerdem sind die Kammern dem heutigen Verkehr nicht mehr gewachsen, dieser hat von 0,45 Mio t im Jahr 1945 auf 2,6 Mio t im Jahr 1957 zugenommen. Bis 1975 nimmt man nochmals eine Verdoppelung an.

Die neue Schleuse ist neben der alten zur Flußmitte hin gelegen (Abb. 15). Die Staumauer nutzt daher von 58 Hochwasserüberfällen nur noch 50 aus. Das ist möglich, weil der Fluß jetzt durch eine größere Anzahl Stauräume im Oberlauf besser reguliert wird als früher; außerdem geht mehr Wasser durch zusätzlich installierte Turbinen ab. Die Schleuse wurde unterwasserseits der Staumauerkrone errichtet, um kostspielige Fangedämme in dem über 25 m tiefen Oberwasser zu vermeiden. Das Oberhaupt ist auf die alte Überfallmauer gebaut worden und die Schleuse wird durch eine

193 m lange Mauer im Unterwasser gegen das Tosbecken der Talsperre geschützt. Im Unterhaupt wurden stählerne Stenmtore angeordnet, die eine beachtenswerte Höhe von 35,3 m aufweisen. Zur Füllung der Kammer wird das Wasser mittels zweier Umlaufstollen von 4,56 m x 4,56 m Querschnitt aus dem Staupraum entnommen und durch die Seitenwände bis zu den Entleerungsöffnungen in der Sohle geführt; der max. Zufluß beträgt dabei 570 m³/s. Die Einläufe befinden sich an der Wasserseite der Staumauer. Nähere Einzelheiten des Füll- und Entleerungssystems sind Abb. 16 zu entnehmen. Unterwasserseits entleeren die Umläufe nach einer Drehung um etwa 90° in das Tosbecken der Talsperre. Flachschießen am Ein- und Auslauf dienen zum Verschuß des Stollens, wobei zur Beschleunigung des Füllens und Entleerens das Ober- und Unterschütz zum Schluß angehoben werden. Das Füllen dauert 12 Minuten, ein ganzer Schleusungsvorgang einschließlich des Ein- und Ausschwimmens 45 Minuten. Die mittlere Steigegeschwindigkeit des Wassers in der Kammer beim Füllen beträgt 4,2 cm/s.

Der Florence-Kanal mußte außerdem vertieft und die alte untere Schleuse mit 3,05 m Hub beseitigt werden. Nach Inbetriebnahme der neuen Schleuse wurde die alte Kuppelschleuse erst einmal außer Betrieb gesetzt und trockengelegt. Die maschinellen Einrichtungen und die Tore wurden vor kurzem generalüberholt, damit die alte Schleuse neben der neuen benutzt werden kann.

2.75 Die Schleuse "Ice Harbour"

Die augenblicklich höchste Einzelhub-Schleuse der Welt ist die Schleuse der Stauanlage Ice Harbour am Snake River, in der Nähe von Pasco im Staate Washington [40]. Mit dem Bau wurde 1956 begonnen und die erste Schleusung erfolgte im Februar 1962. Zusammen mit einer Reihe weiterer, zum Teil schon fertig oder im Bau befindlicher Schleusen mit großen Fallhöhen wird später die Schifffahrt vom Pazifischen Ozean bis nach Lewiston im Staate Idaho möglich sein, wobei auf über 500 Meilen eine gesamte Fallhöhe von 225 m zu überwinden ist. Die Stauanlagen mit ihren Schleusen sind der Reihe nach stromaufwärts Bonneville, The Dalles, John Day, Mc Nary, Ice Harbour, Lower Monumental, Little Goose und Lower Granite.

Der Schleusenhub in Ice Harbour beträgt 103 ft = 31,4 m, obwohl sich bei extremen Entnahmebedingungen in Mc Nary ein max. Hub von 105 ft = 32 m einstellen kann.

Die Ice Harbour Stauanlage besteht neben der Schleuse aus dem Krafthaus mit drei installierten 90 000 kW-Generatoren und drei 143 000 hp Kaplan-Turbinen sowie einer Wehranlage. Letztere besitzt 10 Öffnungen und ist ausgerüstet mit 15,3 m langen und 16,2 m hohen Segmentverschlüssen, die zusammen einen Abfluß von 850 000 cfs gestatten. Die Abb. 17 zeigt eine Luftaufnahme der gesamten Anlage.

Die Schleuse entspricht den Standard-Abmessungen für die Columbia - Snake River - Wasserstraße und ist 206 m lang und 26,2 m breit. Im Oberhaupt der Schleuse wurde ein 6,10 m hohes Segmenttor angeordnet, welches sich in 2 Minuten öffnen kann. Das Untertor, als Hubtor ausgebildet, ist mit einer Höhe 27,7 m und einer Breite von 26,2 m das größte dieser Art, was in den USA bisher gebaut wurde (Abb. 18). Als Vorbild diente das Hubtor der Schleuse Donzère-Mondragon an der Rhone. Die Stahlkonstruktion wiegt 700 t und wird durch elektro-hydraulische Aufzüge mit Gegengewichten betrieben. In zwei Betontürmen auf den Kammerwänden des Unterhauptes sind die Antriebsvorrichtungen untergebracht. Das Tor hebt sich in 3 Minuten bis zur offenen Stellung, dann ergibt sich bei normalem Unterwasser eine lichte Höhe von 21,4 m. Die stromauf- und stromabwärts der Schleuse gelegenen Beton-Leitwerke sind je 214 m lang.

Das Füllsystem besteht aus je 4 Einlauföffnungen in den beiden Leitwänden, einem Längsumlauf in jeder Schleusenwand mit seitlich abzweigenden Stichkanälen unter der Kammersohle sowie einem Auslaßbauwerk, welches direkt in den Fluß außerhalb des Unterhafens mündet (Abb. 19 und 20). Die Einlauföffnungen sind 2,44 m breit und 9,15 m hoch, wobei die eine Hälfte zum Fluß hin liegt. Mit dieser Anordnung werden störende Sunkerscheinungen und Strudelbildungen vor dem Oberhaupt während der Füllung ausgeschlossen. Der Umlaufquerschnitt beträgt am Zulauf 3,66 m x 9,15 m und nimmt ab auf 3,66 m x 4,27 m an den Füllverschlüssen, die umkehrende Segmentverschlüsse sind und in 4 Minuten öffnen können. Anschließend er-

weitem sich die Umläufe auf 3,66 m x 6,10 m und bleiben auf dem größten Teil der Kammerlänge konstant. Vor den Auslaufverschlüssen wurden sie wieder auf 4,27 m in der Höhe reduziert. Diese Segment-schütze sind ähnlich denen für die Füllung, können aber in 2 Minuten öffnen. Ice Harbour ist die erste hohe Hubschleuse, die eine getrennte Anordnung der Stichkanäle besitzt. Jeder der beiden Längs-kanäle speist 5 Querkanäle, die nicht mehr wie bisher im mittleren Schleusendrittel zusammengefaßt sind, sondern etwa in den mitt-leren Dritteln der beiden Schleusenhälften liegen. Ähnliche Füll-systeme enthalten auch die beiden neuen Ohio-Schleusen Markland und Greenup, die zufolge der kleineren Fallhöhen von 10,70 m und 9,15 m für einen Vergleich nicht in Frage kommen.

Die Einzelheiten des Füll- und Entleerungssystems wurden mit Hilfe von hydraulischen Versuchen an einem Schleusenmodell im Maßstab 1 : 25 entwickelt. Es wurden Füll- und Entleerungszeiten, Drücke in den kritischen Teilen der Umläufe, Quer- und Längstrossenkräfte sowie Steigegeschwindigkeiten des Wassers in der Kammer gemessen. Die Füllzeit betrug bei einem Gefälle von 31,4 m gleich 11,4 Minuten; entleert wurde in 14,1 Minuten, und zwar bei sehr kleiner Turbulenz in der Schleusenkammer. Die während des Füllvorganges an einem 11 000 t-Schlepper auftretenden max. Trossenkräfte waren durchschnittlich 3,5 t. Mit 5,5 m/min gleich 9,15 cm/s erhielt man einen hohen Betrag für die Steigegeschwindigkeit des Kammerwasser-spiegels in der Zeit, wo die Verschlüsse gerade voll geöffnet sind. Der entsprechende Zufluß betrug dabei über 18 000 cfs. Die erwähn-ten wechselnden Querschnittsänderungen der Umläufe machten sich erforderlich, um eine gewisse Verbesserung in der Beaufschlagung der Querkanäle zu erzielen sowie im Bereich der Verschlüsse und der Abzweigstellen die Kavitationsgefahr auszuschalten. Druckmes-sungen an der Decke der Längskanäle ergaben bei normalen Betriebs-verhältnissen und den vorgesehenen Hubzeiten stets positive Werte, bei Füllung von nur einem Längskanal aus werden die Drücke unmittel-bar hinter dem Segmentschütz schwach negativ.

Die Beobachtungen des Schleusungsvorganges am fertiggestellten Bauwerk in der Natur zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Modellversuchen. Beim Füllen ist die Turbulenz in der Schleusen-kammer sehr gering, wie aus Abb. 21 ersichtlich, wo der Zeitabschnitt

der größten Unruhe gewählt wurde. Die Füll- und Entleerungszeiten liegen in der Natur etwas niedriger, als es die Modellversuche ergeben haben. Diese Erscheinung ist auch bisher bei anderen Schleusen aufgetreten und wird auf die spezifisch größeren Reibungsverluste im Modell zurückgeführt.

2.8 Zusammenfassung

Wie die vorangegangenen Ausführungen zeigen, ist die Wahl des Füll- und Entleerungssystems bei Schleusen mit großen Fallhöhen - trotz des stets angewendeten langen Umlaufsystems - recht unterschiedlich. Der Beschreibung der Ice Harbour-Schleuse wurde absichtlich etwas mehr Platz eingeräumt, da sie in ihrer Gesamtkonzeption eine der modernsten Anlagen darstellt und bezüglich der Fallhöhe z. Z. den absoluten Weltrekord hält. Die große Anzahl der erbauten amerikanischen Schleusen, verbunden mit systematischer Forschungsarbeit führten zu diesem Ergebnis. Der gesamte Füllquerschnitt beträgt bei Ice Harbour mit $34,7 \text{ m}^2$ nur etwas mehr als die Hälfte von dem der „The Dalles“-Schleuse und die mittlere Steigegeschwindigkeit wird mit $2,7 \text{ m/min}$ nur von der kleineren und niederen Schleuse Donzère-Mondragon an der Rhone übertroffen. Dieses Füll- und Entleerungssystem setzt den vorläufigen Schlußstrich unter eine langjährige Entwicklungsarbeit. Es unterscheidet sich vom typisch "amerikanischen" System einmal, daß anstelle des Stemmtorres im Unterhaupt ein Hubtor mit beachtlichen Abmessungen angeordnet wurde und zum anderen, durch das geteilte Stichkanalsystem. WEHRSCHÜTZ ist der Ansicht, daß mit der konstruktiven Lösung des Füll- und Entleerungssystems von Ice Harbour das technisch-wirtschaftliche Optimum weitgehend erreicht worden ist. Es kennzeichnet eine abgestimmte Bewertung aller gestellten Anforderungen: Kurze Füllzeiten bei turbulenzarmer Füllung, klare hydraulische Verhältnisse, einfache und solide Bauformen und ein Maß an Robustheit für die Erfordernisse des Dauerbetriebes.

Es ist klar, daß sich im allgemeinen die großen amerikanischen Flußschleusen mit ihren Füllsystemen nicht auf die Verhältnisse in Mitteleuropa, speziell auf Deutschland mit seinen Schifffahrtskanälen übertragen lassen. Trotzdem soll die in Abb. 22 wiedergegebene Tabelle mit interessierenden Daten von den höchsten Schleusen der Welt zu Vergleichen Anlaß geben und als Anregung für künf-

tige Projekte von hohen Schleusen dienen. Die Angaben stammen aus [25], wurden aber teilweise mit Hilfe neuer Literatur ergänzt.

3. Die Modellschleuse der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau

3.1 Aufbau und Abmessungen (Abb. 23)

Das Schleusenmodell wurde im Maßstab 1 : 20 zur Natur in der großen Halle der Versuchsanstalt Karlshorst der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau aufgebaut (Abb. 25). Es hat eine Gesamtlänge von 36,0 m und eine Breite von 4,50 m. Die größte Höhe (Oberhafen) beträgt 2,20 m über Hallensole.

3.11 Wasserzuführung und Wasserabführung

Die Wasserzuführung zum Modell erfolgt mittels eines 300 mm-Rohres in ein rd. 4 m breites Vorbecken, das am Anfang durch ein Zickzacküberfall abgeschlossen wird und nach 3 m Länge in den Oberhafen übergeht. Um die Mündung des 300 mm-Rohres wurde ein mit seitlichen Öffnungen versehener Brunnenkranz gemauert, der eine verhältnismäßig turbulenzarme Wasserzufuhr und damit einen ruhigen Wasserspiegel im Oberhafen gewährleistet. Das Zickzackwehr hat die Aufgabe, die Verlängerung des Kanals stromaufwärts möglichst naturgerecht wiederzugeben, da die obere und untere Haltung infolge des großen Ausmaßes nicht der natürlichen Länge entsprechend nachgebildet werden kann. Die Überfallkrone des nach REHBOCK ausgebildeten scharfkantigen Wehres liegt in der oberen Haltung einige Zentimeter unter dem Sollwasserstand. Während des Betriebs muß stets soviel Wasser über das Wehr fließen, daß der für die Schleusung maßgebende Wasserstand gehalten werden kann. Dieses erreicht man durch einen möglichst langen Überfall. Das Abschlußwehr wurde vor dem Modelllaufbau berechnet und so abgestimmt, daß sich im Modell eine der Natur ähnliche Absenkung in der oberen Haltung ergibt. Bei einer Überströmungshöhe $h = 3,5$ cm und bei 14 zu 60 cm Länge aufgegliederten Wehrschenkeln, die unter einem Winkel von 30° zur Strömungsrichtung stehen, ergibt sich ein Abfluß über das Zickzackwehr, wenn kein Schleusungswasser in die Kammer abgezweigt wird;

$$Q = \frac{2}{3} \mu_s \cdot B_s \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \quad (3.1)$$

wobei μ_s = Überfallkoeffizient des schräg gebrochenen Wehres

B_s = Länge des gesamten schräg gebrochenen Wehres
 $= 14 \cdot 0,60 = 8,40 \text{ m}$

Nach [26] ergibt sich für den Überfallkoeffizienten μ_n eines gleichgearteten geraden Wehres mit der Wehrhöhe $w = 16,5 \text{ cm}$

$$\frac{h}{w} = \frac{3,5}{16,5} = 0,212 \longrightarrow \mu_n = 0,652$$

Aus [27] folgt unter Berücksichtigung des Verhältnisses Überfallhöhe h zur Wehrschenkellänge b :

$$\frac{h}{b} = \frac{3,5}{60,0} = 0,058 \longrightarrow \frac{\mu_s}{\mu_n} = 0,96$$

$$\mu_s = 0,96 \cdot 0,652 = \underline{0,625}$$

Den erhaltenen Wert μ_s in Gleichung (3.1) eingesetzt, ergibt:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{2}{3} \cdot 0,625 \cdot 8,40 \sqrt{2g} \cdot (0,035)^{3/2} \\ &= 0,666 \cdot 0,625 \cdot 8,40 \cdot 4,43 \cdot 0,00655 \\ &= 0,1015 \text{ [m}^3/\text{s]} = \underline{102 \text{ [l/s]}} \end{aligned}$$

Das heißt, daß ein dauernd zu haltender Zufluß durch das 300 mm-Rohr von 102 l/s zu erfolgen hat.

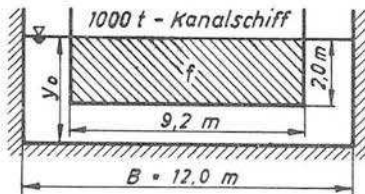
Die Anordnung des Zickzack-Wehres in der unteren Haltung ist ähnlich, nur liegt hier die Oberkante der Überfallkrone in gleicher Höhe mit dem Wasserspiegel im Unterhafen. Beim Leeren der Kammer wird die ankommende Wasserspiegelerhöhung bzw. die Schwallwelle infolge des langen Überfalls abgefangen, so daß auch hier in der unteren Haltung eine naturgerechte Nachahmung bezüglich der Länge gewährleistet ist.

3.12 1 000 t-Kanalschiff und die erforderliche Wassertiefe im Kanal

Für die Untersuchungen über die Größe der Trossenkräfte wird ein 1 000 t-Kanalschiff mit folgenden Abmessungen zugrunde gelegt:

	Natur	Modell (M 1 : 20)
Länge	80,0 m	4,00 m
Breite	9,2 m	0,46 m
Tiefgang	2,0 m	0,10 m

Das Flächenverhältnis von Schleuseneinfahrt F zum Schiffsquerschnitt f soll mindestens $n = \frac{F}{f} = 2,0$ sein [15].



$$12,0 \cdot y_0 \geq 2 \cdot 2,0 \cdot 9,2 \text{ (m)}$$

$$y_0 \geq \frac{4,0 \cdot 9,2}{12,0}$$

$$y_0 \geq 3,07 \text{ m}$$

gewählt $y_0 = 3,50 \text{ m}$

Die Wassertiefe von 3,50 m wird vom Kanalquerschnitt über den Vorhafenquerschnitt zur Schleuseneinfahrt gleichbleibend durchgeführt.

3.13 Vorhäfen (Ober- und Unterhafen)

Der obere Vorhafen wird in einer der Natur entsprechenden Länge von rd. 225 m dargestellt, das Vorbecken bis zum Zickzack-Überfall einbezogen (Abb. 26). Der Vorhafen einer Kanalschleuse erhält im allgemeinen eine Breite, welche der Gesamtbreite von drei der größten vorkommenden Schiffe, im vorliegenden Falle also 1000 t-Kanalschiffe, vermehrt um zwei Spielräume von je 3,0 m, entspricht [15]. Somit ergibt sich die horizontale Schlenbreite:

$$B = 3 \cdot 9,2 + 2 \cdot 3,0 \text{ (m)} = 27,6 + 6,0 = 33,6 \text{ m}$$

gewählt $B = 34,5 \text{ m}$

Daran anschließend erstrecken sich beiderseitig die Böschungen 1 : 4 bzw. 1 : 3 mit den Hochwasserbermen. Zu beiden Seiten der Ufer wurden alle 30,0 m (Natur) Dreier-Dalben mit einer lichten Weite von 37,30 m gegenüberliegend gesetzt.

Der Übergang aus dem Vorhafen in die 12 m breite Schleusenkammer erfolgt durch trichterförmige Leitwerke. Neuere Schleusen weisen beiderseits unter 1 : 5 zur Schleusenachse verlaufende Leitwerke auf; der Vorteil besteht darin, daß jede Seite gleichmäßig als Liegestelle benutzt werden kann [15]. Rechnet man mit einem Maß von

$$\frac{37,30 \text{ m}}{2} - \frac{12,00 \text{ m}}{2} = 18,65 - 6,00 \text{ (m)} = 12,65 \text{ m}$$

als Breite zwischen Festmachevorrichtungen und Verlängerungslinie der Kammerwand, so ergibt sich eine Übergangslänge von $5 \cdot 12,65 \text{ m} \sim 63,0 \text{ m}$. Der Vorhafen geht mittels beiderseitiger 20 m langer Leitwände in das trichterförmige Leitwerk über.

Die Ausbildung des Unterhafens erfolgte in der gleichen Weise. Er ist mit einer Länge von rd. 136 m der Natur entsprechend mit 4 Dalben zu beiden Seiten dargestellt, wenn die wiedergegebene Länge bis zum Beginn des Zickzack-Überfalls gerechnet wird. Dieser Vorhafen wurde etwas kürzer als der Oberhafen gebaut, da hier die turbulenzfreie Anströmung nicht berücksichtigt werden braucht.

3.14 Schleusenammer mit Füll- und Entleerungssystemen

Die Kammerabmessungen der gewählten Schachtschleuse betragen 12,0 m in der Breite und 165,0 m in der Länge. Das entspricht im Modell einer Kammerfläche von 0,60 m x 8,25 m, ein Höhenunterschied von 1,50 m gleich 30 m in der Natur, ist dabei zu überwinden.

Im Oberhaupt wird die Schleuse durch ein Klapptor (Abb. 27), im Unterhaupt durch ein Hubtor (Abb. 29) verschlossen. Die Höhe des Klapptores beträgt $3,50 + 1,00 \text{ (m)} = 4,50 \text{ m}$. Der Querschnitt kann im Modell durch die Klappe in 35 Sekunden freigegeben oder in 30 Sekunden geschlossen werden. Das entspricht in der Natur einer durchschnittlichen Öffnungsgeschwindigkeit von 3 cm/s, bzw. einer Schließgeschwindigkeit von 3,5 cm/s. Bei vollkommener Öffnung liegt die Klappe in einer Sohlennische. Die Dichtung erfolgt beiderseits mittels Gummiwülsten. Konstruktive Ausführung und Hubgeschwindigkeiten der Klappe, entsprechend dem Maßstab umgerechnet, liegen somit im Bereich der in der Natur gebauten Klapptorverschlüsse. Das Hubtor verschließt am Unterhaupt der Schachtschleuse eine Öffnung, deren Höhe sich aus der Forderung der Schifffahrt ergibt, unter Brücken eine lichte Durchfahrtshöhe von 4,0 - 5,0 m über dem angespannten Wasserspiegel freizuhalten. Damit ist die Höhe der Durchfahrtsöffnung zu $5,0 + 3,50 \text{ (m)} = 8,50 \text{ m}$ festgelegt. Die Öffnungszeit des Tores während des ersten Hubes soll dabei etwas länger dauern als die darauffolgende für den restlichen Hub, weil bei einem bestimmten noch nicht ausgespielten Kammerwasserstand

geöffnet werden soll, um die Schleusungszeiten zu verkürzen. Der erste Hub von 60 cm wird in einer Zeit von 160 Sekunden überwunden, im Anschluß daran wird das Tor mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von ca. 3,0 cm/s gehoben. Das Senken des Tores geschieht in der gleichen Weise. Somit entsprechen auch hier Ausföhrung und Hubgeschwindigkeiten durchaus den Großausföhrungen in der Natur.

Die Wasserentnahme zum Füllen der Kammer erfolgt beiderseits am Leitwerk durch 6 runde Einlauföffnungen, die in je einen der beiden Umläufe münden (Abb. 27). Die Wahl des gesamten Umlaufquerschnittes f_1 ergab sich aus folgenden Gesichtspunkten. Nach [15] muß die Durchflußfläche zur Kammerfläche in einem bestimmten Verhältnis stehen, um einmal brauchbare Steigegeschwindigkeiten des Wassers in der Kammer und zum anderen einen nicht zu großen Füllschwall zu erhalten. Das Verhältnis soll bei Schleusen von $B = 12$ m und $L = 165$ m etwa 1 : 200 bis 1 : 250 betragen. Mit einer Kammerfläche $O = 165,0$ m . 12,0 m = 1980,0 m² ergibt sich somit ein anzustrebender Durchflußquerschnitt:

$$\frac{1980,0 \text{ m}^2}{200} = 9,9 \text{ m}^2 \text{ bzw. } \frac{1980,0 \text{ m}^2}{250} = 7,9 \text{ m}^2$$

Wenn für den Umlauf $d = 2,40$ m gewählt wird, hat seine Durchflußfläche die Größe 4,524 m² oder $f_1 = 2 \cdot 4,524 \text{ m}^2 = 9,05 \text{ m}^2$. Der Querschnitt der beiderseitigen 6 Einlauföffnungen mit einem Durchmesser von 1,14 m wurde reichlich bemessen:

$$f_2 = 2 \cdot 6 \cdot 1,02 \text{ m}^2 = 12,2 \text{ m}^2 > f_1 = 9,05 \text{ m}^2$$

Als Verschlußorgane für die beiderseitigen Umläufe wurden Rollkeilschütze eingebaut, je zwei Stück im Oberhaupt zum Füllen der Kammer und je zwei Stück im Unterhaupt zum Leeren der Kammer. Als Hubgeschwindigkeiten für diese Verschlußorgane wurden 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12 mm/s (Natur) gewählt. Sie können nach der im Abschnitt 3.2 beschriebenen Methode beliebig variiert werden.

Drei verschiedene Arten von Füll- und Entleerungssystemen wurden um die Kammer bzw. unter der Kammer des Schleusenmodells angeordnet und dienten somit nacheinander den einzelnen Untersuchungen:

Variante I : Zwei Längsumläufe mit Stichkanälen, versetzt angeordnet

Variante II : Zwei Längsumläufe mit Stichkanälen, gegenüberliegend angeordnet

Variante III : Grundlauf in der Sohlenmitte

Bei den Varianten I und II wurden im Modell beiderseitig der Kammerwand je 17 Stichkanäle angeordnet, wobei nur jeder zweite an die Längsumläufe angeschlossen war (Abb. 34). Durch Versetzen des einen Umlaufes um einen Stichkanal in Längsrichtung konnten die beiden Varianten Längsumläufe mit Stichkanälen versetzt und mit Stichkanälen gegenüberliegend hergestellt werden.

Der Durchmesser der Stichkanäle wurde mit $d = 1,14 \text{ m}$, bezogen auf die Natur, gewählt, der Abstand untereinander $19,0 \text{ m}$. Bei der Anordnung von insgesamt 17 Querkanälen ergibt sich eine Durchflußfläche $f_s = 17 \cdot 1,02 = 17,34 \text{ m}^2$. Das charakteristische Verhältnis Stichkanalquerschnitt zum Umlaufquerschnitt ist demnach

$$\frac{f_s}{f_1} = \frac{17,34 \text{ m}^2}{9,05 \text{ m}^2} = 1,9$$

In [15] werden recht unterschiedliche Verhältnisse f_s/f_1 von deutschen Schleusen angegeben, die zwischen 1,2 und 3,7 liegen. Letzterer Wert ergibt sich bei der Schachtschleuse Anderten und ist durch den Sparbeckenbetrieb bedingt. WÖSSNER [14] schlägt ein Verhältnis $f_s/f_1 = 1,2$ vor. MÁSIAR [32] findet an Hand der gebauten tschechoslowakischen Schleusen mit größerem Gefälle und unter Berücksichtigung von Modellversuchen den Wert von rd. 1,6 am günstigsten. Bei amerikanischen Schleusen mit großen Fallhöhen soll ein Verhältnis

$$\frac{f_s}{f_1} = 2,0 \text{ bis } 2,2$$

bestehen.

Für die Variante III Grundlauf wurde als Vorbild das in der Wilson-Schleuse (USA) eingebaute sehr einfache Füll- und Entleerungssystem genommen (Abschnitt 2.74). Ein unter der Sohle in Kammerachse liegender rechteckiger Kanal mit einem Querschnitt $3,20 \text{ m} \times 2,86 \text{ m}$ ist an die oberen bzw. unteren beiden Rollkeilschütze in den Umläufen angeschlossen und besitzt im mittleren Drittel der Kammerlänge beiderseitig je 10 Durchlaßöffnungen $1,0 \text{ m} \times 0,7 \text{ m}$. Auf

ihrer gesamten Länge vor den Austrittsöffnungen befinden sich zu beiden Seiten in 2,0 m Breite und in der Tiefe des Grundkanals je eine Aussparung, wo das horizontal am Boden des Grundkanals durch die Austrittsöffnungen strömende Wasser vertikal nach oben umgelenkt wird und somit von der Sohle aus in die Kammer tritt (Abb. 28). Die Querschnittsverhältnisse bei diesem Grundlaufsystem sind folgende:

$$f_G = 3,20 \cdot 2,86 \text{ (m}^2\text{)} = 9,15 \text{ m}^2 > f_1 = 9,05 \text{ m}^2$$

Bei 20 Durchlaßöffnungen ergibt sich $f_D = 20 \cdot 1,0 \cdot 0,7 \text{ (m}^2\text{)} = 14,0 \text{ m}^2$, es wird

$$\frac{f_D}{f_G} = \frac{14,0 \text{ m}^2}{9,05 \text{ m}^2} = 1,55$$

Zwecks Leeren der Kammer sind die Längsumläufe bzw. der Grundlauf an den beiden Umläufen am Unterhaupt angeschlossen, in denen mittels Rollkeilschützen der Abfluß reguliert werden kann (Abb. 40). Diese Umläufe münden am trichterförmigen Leitwerk über je 5 gegenüberliegende Querkänäle mit einem Durchmesser von 1,14 m ins Unterwasser. Hier ist der Querschnittswert

$$f_A = 2 \cdot 5 \cdot 1,02 \text{ (m}^2\text{)} = 10,2 \text{ m}^2 > f_1 = 9,05 \text{ m}^2 \\ > f_G = 9,15 \text{ m}^2$$

Abschließend sei noch erwähnt, daß zur besseren Veranschaulichung der Schleusungsvorgänge die eine Kammerwand vollkommen verglast wurde.

3.2 Meßeinrichtungen sowie Automatik für Bedienung und Registrierung der Versuchsergebnisse (Abb. 24)

3.21 Registrierung der Wasserstandslinien im Ober- und Unterhafen

Um die Sunk- und Schwallerscheinungen während des Schleusungsvorganges zu erfassen, wurden in der Mittelachse des Oberhafens drei und entsprechend im Unterhafen zwei Schwimmer aufgestellt. Der Abstand untereinander beträgt 4,50 m. Der Schwimmer III wurde in Höhe der beiderseitigen ersten Stichkanäle des Einlaufsystems angeordnet (Abb. 27). Der Standort des Schwimmers IV wurde aus Gründen einer besseren Aufzeichnung um 1,85 m vom Auslauf, dem Kern der turbulenten Zone, in Richtung zum Unterwasser verlegt. Dieser Platz liegt

in derselben Flucht mit dem Bug eines an der ungünstigsten Stelle im Unterhafen wartenden Schiffes.

Die Registrierung der Wasserspiegeländerungen erfolgte elektromechanisch durch Pegel mit elektrischer Fernübertragung. Der Schwimmer betätigt mittels Seilzug einen Drehmelder-Geber, der die jeweiligen Wasserspiegelschwankungen dem Drehmelder-Empfänger elektrisch übermittelt. Dieser bringt die Werte über eine Schreibfeder auf eine sich drehende Trommel zu Papier. Das Übersetzungsverhältnis beträgt 1 : 1. Um neben den aufgezeichneten Kurven einen Zeitmaßstab zu erhalten, werden am Rand des Papiers Zeitkontakte im Rhythmus von 10 Sekunden mittels einer zentralgesteuerten Kontaktuhr aufgebracht.

3.22 Registrierung der Füllkurve in der Kammer

Zur Messung des zeitlichen Wasseranstieges beim Schleusungsvorgang, wurden drei Schwimmer in der Kammer angeordnet, und zwar die beiden äußersten in 60 cm Abstand vom Ober- bzw. Unterhaupt (Abb. 28). Die Registrierung erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie unter 3,21 beschrieben. Hier beträgt das Übersetzungsverhältnis der Füllkurve am Schleusenmodell zur aufgezeichneten Füllkurve auf der Trommel wie 1,5 : 1 (Abb. 30).

3.23 Registrierung der Trossenkräfte an einem 1 000 t-Kanalschiff

Die Aufzeichnung der Kräfte erfolgt einmal an einem in Kammermitte liegendem Schiff (Abb. 37), zum anderen an der ungünstigsten Stelle eines im Ober- und Unterhafen wartenden Schiffes (Abb. 25 u. 26). Zu diesem Zweck wurde über jedes Schiff an 6 dünnen Drähten ein Meßrahmen aufgehängt, der an beiden Enden je eine Rollenführung für die Masten des Modellschiffes besitzt. Die runden Metallmasten können sich fast ohne Reibung an diesen Führungen auf und ab bewegen, andererseits können sie über die Rollenführungen jede Schiffsbewegung auf den Meßrahmen übertragen. Auf der einen Kammerwand bzw. im Querschnitt der Vorhäfen wurde an einer Stütze eine geeichte Blattfeder montiert. Sie überträgt mit Hilfe des Meßrahmens und einer Schreibfeder die Bewegung des Schiffes auf einem Kymographen. Auch hier wird während des Versuchsablaufes wieder ein Zeitkontakt im 10 Sekunden-Rhythmus seitlich der Registrierung aufgezeichnet.

Im Ober- und Unterhafen wurden Längskräfte, in der Schleusenammer Längs- und Querkkräfte registriert.

3.24 Bedienung der Betriebsmittel für die Verschlußorgane der Schleuse

Die gleichmäßige Bewegung der Rollkeilschütze in den Umläufen erfolgte durch eine an einem Wagen befestigte und entsprechend ausgebildete schiefe Ebene, auf der eine mit dem Schütz verbundene Rolle bei gleicher Fahrtrichtung des Wagens abläuft (Abb. 32 u. 33). Somit konnte auch bei gleichbleibender Drehzahl des Motors eine maßstabsgetreue schnellere Schließzeit erreicht werden. Die Fahrt zur Ausgangstellung geschieht in umgekehrter Richtung durch Betätigung eines Motorwendeschalters. In diesem Falle bleibt das Schütz geschlossen und die Rolle läuft unter der schiefen Ebene in die Null-Lage zurück. Die jeweils gegenüberliegenden Schützen werden durch über Rollen laufende Seilzüge gleichzeitig mit betätigt. Durch auswechselbare Seilscheiben auf der Antriebsachse können die benötigten unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Verschlußorgane erreicht werden.

Zum Heben und Senken des Hubtores am Unterhaupt wird ebenfalls eine entsprechend ausgebildete schiefe Ebene benutzt (Abb. 33). Diese besitzt zwei verschiedene Schrägen, so daß die Hub- und Senkzeit in sich variiert (langsames Anfahren beim Öffnen). Beim Schließvorgang läuft die Rolle mit angehängtem Hubtor auf der gleichen schiefen Ebene mit derselben Geschwindigkeit zurück. Der Antrieb erfolgt auch hier wie bei allen Verschlußorganen mit Hilfe eines Elektromotors über ein Getriebe.

Im Oberhaupt wird das Klapptor durch ein über Rollen laufendes Drahtseil, welches in der Mitte befestigt war, betätigt (Abb. 27). Da man hier nur eine konstante Öffnungs- und Schließzeit benötigt, konnte auf eine schiefe Ebene verzichtet werden.

Für den Antrieb sämtlicher Verschlußorgane fanden 120 W Wechselstrommotore mit $n = 1300$ U/min Anwendung. Als Zwischenstufe wurden 3-stufige Getriebe (1 U = 45 s, 1 U = 60 s und 1 U = 90 s) eingebaut.

3.25 Steuerung und Regelung der Betriebsvorgänge

Die Steuerung sämtlicher Messungen sowie die Kommandos für die Rollschleifschütze, für das Klapp- bzw. Hubtor wurden von einem zentralen Schaltpult aus vorgenommen (Abb. 31). Die Steuerorgane (Relais etc.) sind für eine Kleinspannung von 24 V Gleichstrom angelegt worden. Das Einschalten der Schützen erfolgt durch Tastendruck, das Ausschalten des jeweiligen Betriebsvorganges automatisch durch Endschalter. Zum Schließen bzw. zur Rückwärtsfahrt des Wagens mit der schiefen Ebene in die Ausgangsstellung muß ebenfalls eine Taste betätigt werden. Auch hier erfolgt die jeweilige Ausschaltung automatisch durch Endschalter. Gleichzeitig wird der z. Z. herrschende Betriebszustand mittels Lichtsignale zum Schaltpult gemeldet.

Das Ansprechen des Klapp- bzw. Hubtores erfolgt nach dem erforderlichen Wasserstand in der Kammer vollautomatisch mittels elektrischer Pegel; die Ausschaltung verläuft auch hier über Endschalter. Die jeweiligen Betriebszustände werden ebenfalls durch Lichtsignale auf dem Schaltpult angezeigt.

Gleichzeitig können von dem zentralen Schaltpult aus sämtliche Meßvorgänge (Kymographen, Drehmelder, Trommeln etc.) gesteuert werden. Die Erzeugung der Zeitimpulse geschieht im Schaltkasten. Zur Kontrolle der Wasserstände im Ober- und Unterhafen wurden elektrische Pegel eingebaut, die bei Abfall bzw. Anstieg des Wasserspiegels Lichtzeichen geben.

4. Ähnlichkeitsbetrachtungen nach der Theorie der Dimensionen

Zur Übertragung der aus den Modellversuchen gewonnenen Ergebnisse auf die Natur, werden in diesem Abschnitt das für Schleusenuntersuchungen gültige Ähnlichkeitsgesetz abgeleitet und die Umrechnungsverhältnisse bestimmt.

4.1 Anwendung des π -Theorems auf eine allgemeine hydraulische Aufgabenstellung

Das π -Theorem von BUCKINGHAM [28] kann man benutzen, um für irgendeine hydraulische Aufgabenstellung eine ganz allgemein verwertbare Lösung zu erhalten.

Beispielsweise wird der Abfluß im allgemeinsten Falle bedingt durch zwei lineare Abmessungen a und b , durch die Geschwindigkeit v

und den Druck p , ferner durch das spezifische Gewicht γ , die Dichte ϱ , die Zähigkeit μ und durch die Oberflächenspannung σ der Flüssigkeit. Diese Abhängigkeiten können ausgedrückt werden

$$f(a, b, v, p, \gamma, \varrho, \mu, \sigma) = 0, \quad (4.1)$$

wobei 8 Größen enthalten sind, von denen zwei dieselbe Dimension besitzen. Da drei Grunddimensionen Länge (L), Zeit (T), Kraft (P) auftreten, sind

$$(8 - 1) - 3 = 4$$

π -Kennzahlen erforderlich und zusätzlich ein aus dem dimensionslosen Verhältnis a/b gebildetes Glied π_1 .

Werden die Größen a , v und ϱ mit den unbekannten Exponenten versehen, so wird

$$\begin{aligned} \pi_1 &= a/b \cdot x_2 \\ \pi_2 &= a^{x_2} \cdot v^{y_2} \cdot \varrho^{z_2} \cdot p \\ \pi_3 &= a^{x_3} \cdot v^{y_3} \cdot \varrho^{z_3} \cdot \gamma \\ \pi_4 &= a^{x_4} \cdot v^{y_4} \cdot \varrho^{z_4} \cdot \mu \\ \pi_5 &= a^{x_5} \cdot v^{y_5} \cdot \varrho^{z_5} \cdot \sigma \end{aligned}$$

Die unbekannten Exponenten werden nach dem Grundsatz der homogenen Dimensionen bestimmt, so daß sich für die π -Kennzahlen ergibt:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= a/b \\ \pi_2 &= \frac{p}{\varrho \cdot v^2} \\ \pi_3 &= \frac{\gamma \cdot a}{\varrho \cdot v^2} \\ \pi_4 &= \frac{\mu}{a \cdot \varrho \cdot v} \\ \pi_5 &= \frac{\sigma}{a \cdot \varrho \cdot v^2} \end{aligned}$$

Gleichung (4.1) kann nun beschrieben werden

$$\phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) = 0$$

oder

$$\phi \left(\frac{a}{b}, \frac{p}{\rho \cdot v^2}, \frac{\mu \cdot a}{\rho \cdot v}, \frac{\mu}{a \cdot \rho \cdot v}, \frac{\delta}{a \cdot \rho \cdot v^2} \right) = 0 \quad (4.2)$$

Werden die Beziehung zwischen dem hydraulischen Druck p und der Druckhöhe h

$$p = \rho \cdot h,$$

der Ausdruck

$$\rho = \frac{\rho'}{g} \quad (g = \text{Fallbeschleunigung})$$

sowie die kinematische Viskosität

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

in der Gleichung (4.2) berücksichtigt, so ergibt sich

$$\phi \left(\frac{a}{b}, \frac{v^2}{2gh}, \frac{v^2}{\rho \cdot a}, \frac{a \cdot v}{\nu}, v^2 \cdot \frac{\rho \cdot a}{\rho} \right) = 0 \quad (4.3)$$

Die vier letzten Kennzahlen in obiger Gleichung spielen eine wichtige Rolle in der angewandten Hydraulik.

4.2 Bestimmung der hydraulischen Kennzahl speziell für Schleusen- untersuchungen

Die Aufgabenstellung lautet im vorliegenden Falle so, daß die Flüssigkeitsbewegung von einer linearen Abmessung a , der mittleren Geschwindigkeit v und der Fallbeschleunigung g abhängt. Der Einfluß der Viskosität ν , also der Flüssigkeitsreibung kann bei dem gewählten großen Modellmaßstab und der damit verbundenen turbulenten Wasserbewegung vernachlässigt werden. Somit wird die π -Kennzahl ausgedrückt

$$\pi = a^x \cdot g^y \cdot v$$

und mit der Einführung der Dimensionen durch

$$\pi = (L)^x \cdot (L \cdot T^{-2})^y \cdot (L \cdot T^{-1})$$

$$\pi = L^{(x+y+1)} \cdot T^{(-2y-1)},$$

d. h.

$$x + y + 1 = 0$$

$$-2y - 1 = 0$$

$$\underline{y = -\frac{1}{2} \quad x = -\frac{1}{2}}$$

Die Kennzahl heißt demnach

$$\Pi = a^{-\frac{1}{2}} \cdot g^{-\frac{1}{2}} \cdot v = \frac{v}{\sqrt{g \cdot a}} = F \quad (4.4)$$

und stellt die FROUDEsche Zahl dar. Das dritte Glied der Gleichung (4.3) entspricht dieser Kennzahl.

4.3 Übertragungsverhältnisse Modell zur Natur

Die durchzuführenden Versuche unterliegen also auf Grund der hauptsächlich wirkenden Schwere- und Trägheitskräfte dem FROUDEschen Gesetz. Die Vorgänge verlaufen im Modell und in der Natur dynamisch ähnlich, wenn in beiden Fällen die FROUDEsche Kennzahl

$$F = \frac{v^2}{g \cdot a} = \frac{V^2}{g \cdot A}$$

gleich ist, wobei kleine Buchstaben für das Modell und große für die Natur gelten; a bzw. A ist eine schon erwähnte charakteristische Bezugslänge.

Bezeichnet n das geometrische Maßstabsverhältnis der Längen, so ergeben sich am unverzerrten Schleusenmodell mit n = 20 folgende Umrechnungsmaßstäbe:

Bezeichnung	Dimension	Verhältnisgleichung
Längen, Breiten u. Tiefen	m	$a = \frac{A}{n} = \frac{A}{20}$; $A = 20 \cdot a$
Flächen	m ²	$f = \frac{F}{n^2} = \frac{F}{20^2} = \frac{F}{400}$; $F = 400 \cdot f$
Rauminhalte	m ³	$\text{vol} = \frac{\text{Vol}}{n^3} = \frac{\text{Vol}}{20^3} = \frac{\text{Vol}}{8000}$; $\text{Vol} = 8000 \cdot \text{vol}$
und Kräfte	t	$p = \frac{P}{n^3}$ entsprechend $P = 8000 \cdot p$
Geschwindigkeiten	m/s	$v = \frac{V}{\sqrt{n}} = \frac{V}{\sqrt{20}} = \frac{V}{4,4721}$; $V = 4,4721 \cdot v$
u. Zeiten	s	$t = \frac{T}{\sqrt{n}}$ entsprechend $T = 4,4721 \cdot t$

Bezeichnung	Dimension	Verhältnisgleichung
Abflüsse	m^3/s	$q = f \cdot v$ bzw. $Q = F \cdot V$
		$q = \frac{F}{n^2} \cdot \frac{V}{\sqrt{n}} = \frac{F \cdot V}{n^{5/2}} = \frac{Q}{20^{5/2}} = \frac{Q}{1788,8}$
		$Q = 1788,8 \cdot q$

5. Hydrodynamische Vorgänge beim Füllen und Entleeren in der Schleusenammer

Die hydrodynamischen Vorgänge während der Schleusung in der Kammer sowie die Auswirkungen auf das in ihr liegende Schiff sind weitgehend vom zeitlichen Verlauf des Zuflusses abhängig. Dieser wird vor allem von der Größe und Freigabe der Füllöffnungen, den Abmessungen der Schleuse und der Art der Kammerfüllung bestimmt sowie durch die Zuflußkurve $Q = f(t)$ charakterisiert. Zur Zeit t_{\max} erreicht der Zufluß seinen Größtwert und die Hubkurve des Kammerwasserspiegels den größten Anstieg (siehe Abb. 50 u. 52). Aus diesen sogenannten Schleusencharakteristiken kann man außerdem die max. sekundliche Zunahme des Zuflusses und die gesamte Füllzeit T entnehmen.

Grundsätzlich muß zwischen zwei Arten der Füllung unterschieden werden:

- a) Füllung mit hochliegendem Dremel
- b) Füllung mit tiefliegendem Dremel

Im vorliegenden Falle der zu untersuchenden Schleuse mit den Füll- und Entleerungssystemen Längsumläufe mit Stichkanälen sowie Grundlauf handelt es sich um eine Füllart mit tiefliegendem Dremel. Hier strömt das Wasser bei Öffnung des Füllquerschnittes unterhalb des UW-Spiegels in die Kammer. Bei Schleusen dieser Systeme wird das Obertor im allgemeinen nicht mit zur Füllung herangezogen, als Füllorgane verwendet man besondere Verschlüsse in den Umläufen etc.

Das Füllen der Schleusenammer ist ein nichtstationärer Strömungsvorgang. Zu seiner Berechnung werden zwei Verfahren angegeben, mittels derer man bei vorgegebenen Abmessungen der Kammer und des Füllsystems sowie bei verschiedenen Hubgeschwindigkeiten der Rollkeilschütze die für einen Schleusungsvorgang charakteristischen

Werte erhält. Mit Hilfe von Modellversuchen werden die Ergebnisse kritisch betrachtet sowie die Größe der dabei auftretenden Trosenkräfte bestimmt und in den Graphiken zusammengestellt.

Für die Ableitungen wurden nachstehende Bezeichnungen verwendet:

H_0 = Anfangsdruckhöhe (m)

H_t = zur Zeit t während des Füllvorganges zur Verfügung stehende Druckhöhe (m)

H_{ges} = Schleusenhubhöhe (m) = Differenz zwischen OW- und UW-Spiegel

h_m = mittlere Druckhöhe (m) in einem bestimmten Zeitintervall

f_t = zur Zeit t vorhandener Füllquerschnitt (m^2)

f_1 = Größe des Füllquerschnittes (m^2) nach restloser Freigabe
= $9,05 m^2$ bei $2 \times \phi 2,40 m$

O = Kammerfläche (m^2)
= $12,0 m \times 165,0 m = 1980,0 m^2$

t = Zeit (s)

t_1 = Zeit (s), nach welcher der Füllquerschnitt freigegeben ist

T = Schleusenfüllzeit (s)

V_s = Hubgeschwindigkeit des Schützes (m/s)

S = Hubhöhe des Schützes (m)
= $2,40 m$

n = $\frac{f_1}{t_1}$ = sekundliche Querschnittsfreigabe (m^2/s)

μ = Zuflußbeiwert

Q_t = Zufluß (m^3/s) zur Zeit t

Q_{max} = größter Zufluß während des Schleusungsvorganges

5.1 Theoretische Ermittlung der Schleusencharakteristiken

5.11 Analytische Bestimmung der Beziehung $Q = f(t)$ und der sich daraus ergebenden charakteristischen Werte

5.111 Die Füllphasen

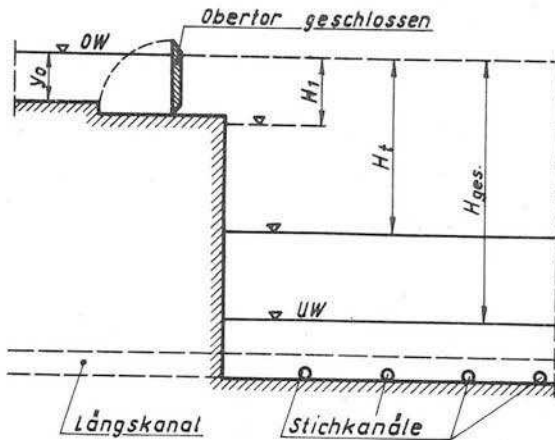
Die Schleusenfüllung mit tiefliegendem Drempel erfolgt im allgemeinen in zwei Füllphasen [29]. Während der ersten Phase wird der

Füllquerschnitt f_1 in der Zeit t_1 stetig freigegeben. Die Druckhöhe nimmt dabei ständig ab, da das Füllwasser unter dem Kammerwasserspiegel in die Schleuse einströmt.

Die zweite Phase ist während eines Füllvorganges vorhanden, wenn der Füllquerschnitt f_1 noch vor Beendigung der Schleusenfüllung freigegeben ist, d. h. wenn $t_1 < T$. Hier nimmt also bei konstantem Füllquerschnitt die Druckhöhe weiterhin ab.

Erste Füllphase

Bei Annahme eines konstanten Zuflußbeiwertes μ während der 1. Phase gilt mit den Bezeichnungen der Abbildung:



$$dV = Q_{ge} \cdot dt = - Q \cdot dH = \mu \cdot \frac{f_1}{t_1} \cdot t \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_t} \cdot dt$$

$$\int_{H_{ges}}^{H_t} \frac{dH}{\sqrt{H}} = - \frac{\mu \cdot \frac{f_1}{t_1} \cdot \sqrt{2g}}{0} \cdot \int_0^t t \cdot dt$$

wobei $H_1 < H_t < H_{ges}$

$$0 < t < t_1$$

Durch Integration folgt:

$$\sqrt{H_t} = \sqrt{H_{ges}} - \frac{\mu \cdot \frac{f_1}{t_1} \cdot \sqrt{2g}}{4 \cdot 0} \cdot t^2 \quad (5.1)$$

Diese Gleichung in die Beziehung

$$Q_t = \mu \cdot f_t \cdot \sqrt{2g \cdot H_t}$$

eingesetzt, ergibt den Zufluß zu jedem Zeitpunkt, wenn $0 < t < t_1$ ist:

$$Q_t = \mu \cdot \frac{f_1}{t_1} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_{\text{ges}}} \cdot t - \frac{\mu^2 \cdot \left(\frac{f_1}{t_1}\right)^2 \cdot g}{2 \cdot 0} \cdot t^3 \quad (5.2)$$

Die Zunahme des Zuflusses während der ersten Füllphase beträgt:

$$\frac{dQ}{dt} = \mu \cdot \frac{f_1}{t_1} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_{\text{ges}}} - \frac{3 \cdot \mu^2 \cdot \left(\frac{f_1}{t_1}\right)^2 \cdot g}{2 \cdot 0} \cdot t^2 \quad (5.3)$$

Für $t = 0$ folgt die Beziehung für die max. Zunahme des Zuflusses:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\text{max}} = \left(\frac{dQ}{dt}\right)_{t=0} = \mu \cdot n \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_{\text{ges}}} \quad (5.4)$$

Für $t > 0$ nimmt $\frac{d^2Q}{dt^2}$ Werte kleiner als Null an, d. h. die Kurve

$Q = f(t)$ ist im Bereich $0 < t < t_1$ nach oben gekrümmt. Die sekundliche Zunahme des Zuflusses nimmt demnach während der ersten Füllphase mit wachsendem t ständig ab.

Die aufgestellten Diagramme der Abb. 41 und 42 zeigen die max. Zunahme des Zuflusses in Abhängigkeit von der sekundlichen Freigabe des Füllquerschnittes und verschiedenen Zuflußbeiwerten ($\mu = 0,20$ bis $0,75$) sowie der Schleusenhubhöhe ($H_{\text{ges}} = 16,0$ bis $38,0$ m).

Zweite Füllphase

Aus Gleichung (5.1) ergibt sich für $t = t_1$ die am Ende der ersten Füllphase noch zur Verfügung stehende Druckhöhe H_1 zu:

$$\sqrt{H_1} = \sqrt{H_{\text{ges}}} - \frac{\mu \cdot f_1 \cdot \sqrt{2g}}{4 \cdot 0} \cdot t_1 \quad (5.5)$$

Die zu einem beliebigen Zeitpunkt $t_1 < t < T$ während der 2. Füllphase vorhandene Druckhöhe $0 < H_t < H_1$ beträgt:

$$\sqrt{H_t} = \sqrt{H_1} - \frac{\mu \cdot f_1 \cdot \sqrt{2g}}{2 \cdot 0} \cdot (t - t_1) \quad (5.6)$$

Damit ergibt sich der Zufluß bei Verwendung von (5.5) zu:

$$Q_t = \mu \cdot f_1 \cdot \sqrt{2g} \left[\sqrt{H_{\text{ges}}} - \frac{\mu \cdot f_1 \cdot \sqrt{2g}}{2 \cdot 0} \cdot \left(t - \frac{t_1}{2} \right) \right] \quad (5.7)$$

Die Zunahme des Zuflusses ist dabei:

$$\frac{dQ}{dt} = - \frac{\mu \cdot f_1^2 \cdot g}{0} = \text{konstant}$$

d. h., daß bei der angenommenen Vereinfachung eines konstanten Beiwertes μ der Zufluß während der 2. Füllphase linear mit der Zeit abnimmt. Dieses zeigen auch deutlich die nach dem zweiten Verfahren aufgestellten Kurven für die Schleusencharakteristiken in den Abb. 50 u. 52.

5.112 Maximaler Zufluß Q_{max}

Der Zufluß erreicht zur Zeit $t_{\text{max}} \leq t_1$ seinen Größtwert. Aus Gleichung (5.3) ergibt sich für

$$\frac{dQ}{dt} = 0: \quad t_{\text{max}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0 \cdot \sqrt{H_{\text{ges}}}}{3 \cdot \mu \cdot n \cdot \sqrt{2g}}} \quad (5.8)$$

Auch hier wurde die Beziehung der zum max. Zufluß Q_{max} gehörige Füllzeit t_{max} unter Berücksichtigung verschiedener sekundlicher Querschnittsfreigaben bei variierenden Beiwerten μ sowie der Schleusenhubhöhe H_{ges} mittels Graphiken in den Abb. 43 u. 44 dargestellt.

Bei Einsetzen von Gleichung (5.8) in die Beziehung (5.2) folgt nach einigen Umformungen unter Verwendung der Füllwasserfracht

$$Q_F = 0 \cdot H_{\text{ges}}:$$

$$Q_{\text{max}} = \sqrt{\frac{16}{27} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot n \cdot Q_F \cdot \sqrt{H_{\text{ges}}}} \quad (5.9)$$

Die Diagramme in den Abb. 45 u. 46 ermöglichen eine rasche Ermittlung des größten Zuflusses Q_{max} für verschiedene μ -Werte und Hubhöhen.

5.113 Gesamte Schleusenfüllzeit T

Die Ableitung der Füll- bzw. Leerzeit nach den Ansätzen von WITTMANN und BILMINGS [10] ergibt die Gleichung

$$T = \frac{2 \cdot 0 \cdot \sqrt{H_{\text{ges}}}}{\mu \cdot f_1 \sqrt{2g}} \quad (5.10)$$

Hierbei wird aber vorausgesetzt, daß schon von Anfang an die gesamte Umlauföffnung f_1 wirksam ist, was nicht den natürlichen Verhältnissen entspricht. Man muß wieder die beiden Füllphasen mit den Zeitintervallen t_1 und $(T - t_1)$ berücksichtigen.

Wenn S die Hubhöhe der Schütze darstellt, folgt für die Zeit, die zum Anheben der Umlaufschütze bis zur völligen Freigabe der Zuflußöffnung benötigt wird:

$$t_1 = \frac{S}{v_s} \quad (5.11)$$

Die gesamte Füll- bzw. Leerzeit ergibt sich nach [7] aus der Beziehung:

$$T = \frac{S}{v_s} \left(1 - \frac{\mu_m}{\mu}\right) + \frac{2 \cdot 0 \cdot \sqrt{H_{\text{ges}}}}{\mu \cdot f_1 \sqrt{2g}} \quad (5.12)$$

Dabei stellt μ einen Größtwert und μ_m einen von der jeweiligen Hubhöhe abhängigen Mittelwert dar. Nach den Erfahrungen der früheren Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau kann der Klammerwert genau genug zu 0,5 angesetzt werden, so daß die vereinfachte Gleichung

$$T = 0,5 \frac{S}{v_s} + \frac{2 \cdot 0 \cdot \sqrt{H_{\text{ges}}}}{\mu \cdot f_1 \cdot \sqrt{2g}} \quad (5.13)$$

entsteht. Die nach (5.10) errechnete Füllzeit wird somit um die halbe Hubzeit der Schütze verlängert.

In Diagrammen der Abb. 47 u. 48 wurde obige Beziehung für verschiedene Zuflußbeiwerte μ und Hubhöhen H_{ges} ausgewertet.

5.12 Punktweise Ermittlung der Zufluß- und Füllkurven aus dem abnehmendem Druckgefälle h_m

Die zu Grunde gelegte Schleuse mit den bekannten Abmessungen und einem Gefälle $H_{\text{ges}} = 30,0$ m soll für 6 verschiedene Hubgeschwindigkeiten der Rollkeilschütze: 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12 (mm/s) untersucht werden. Mit Hilfe gleichmäßiger Zeitintervalle $\Delta t = 20$ Sekunden geschieht die punktweise Berechnung der Zufluß- und Fülllinien

derart, daß man den Zufluß

$$Q_{\Delta t} = \mu \cdot f_{\Delta t} \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_m} \quad (5.14)$$

aus dem abnehmenden mittleren Druckgefälle h_m ermittelt [15], wobei der Beiwert $\mu = \text{konstant} = 0,50$ angenommen wird. Zunächst wurde die mit dem Schützhub wachsende sogenannte wirksame Durchflußfläche $\mu \cdot f \cdot \sqrt{2g}$ in Abhängigkeit von der Hubzeit aufgetragen, wobei in den Abb. 50 u. 52 die Kurven für $v_s = 6 \text{ mm/s}$ und $v_s = 12 \text{ mm/s}$ dargestellt wurden. Aus den nach dieser Bezugslinie zunehmenden Wassermengen $Q \cdot \Delta t$ und der Kammerfläche O lassen sich die einzelnen Füllhöhen $\Delta h = \frac{Q \cdot \Delta t}{O}$ entsprechend den wiedergegebenen Tabellen berechnen. Der laufend erfolgende Abzug der Werte Δh vom Anfangsgefälle $H_{\text{ges}} = 30,0 \text{ m}$ ergibt, meistens durch wiederholtes Probieren, die Druckhöhen h_m , die vornweg zur Bestimmung der Zuflüsse Q erforderlich gewesen sind. Aus den endgültig gefundenen Werten Q wird als Ergebnis der Rechnung die sekundliche Zuflußlinie und aus den Werten Δh die Fülllinie in Beziehung zur Füllzeit aufgetragen.

An Hand dieser Kurven konnten die charakteristischen Werte Q_{max} , t_{max} , die maximale sekundliche Zunahme des Zuflusses $(\frac{\Delta Q}{\Delta t})_{\text{max}}$ sowie die in vorigem Abschnitt nicht berechneten max. Steigegeschwindigkeiten des Wassers in der Kammer s_{max} ermittelt werden. Der abfallende Ast der Zuflußkurve ergibt den genauen Wert der Füllzeit T . Außerdem wurden die dimensionslosen Verhältnisse s_m/s_{max} ($s_m =$ mittlere Steigegeschwindigkeit) und Q_m/Q_{max} ($Q_m =$ mittlerer Zufluß) aufgestellt.

Das in [30] angegebene Näherungsverfahren für die Füllungsberechnung von Schleusen beruht auf dem gleichen Prinzip. Man kommt bei Wahl der Zeitintervalle $\Delta t = 20$ Sekunden und den entsprechend vorgegebenen Daten zu demselben Ergebnis. Lediglich das wiederholte Probieren durch die zunächst angenommenen mittleren Druckhöhen h_m entfällt infolge einer dort angeführten numerischen Beziehung.

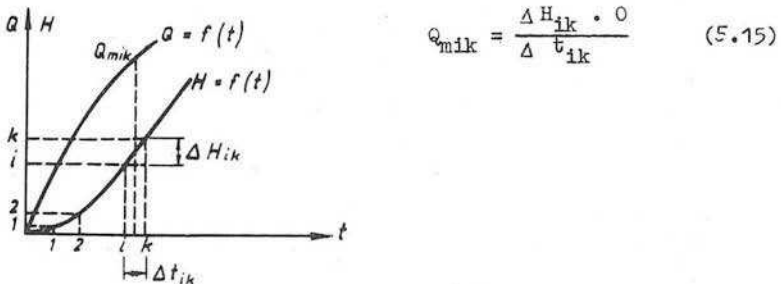
In den Tabellen der Abb. 49 u. 51 wird die punktweise Ermittlung der Zufluß- und Füllkurven für die erwähnten zwei Öffnungsgeschwindigkeiten der Umläufe wiedergegeben.

5.2 Modellversuche über die Schleusungsvorgänge in der Kammer

5.21 Registrierung der Füllkurven und Auswertung derselben

Die Messung der zeitlichen Wasserspiegeländerungen in der Kammer während des Schleusungsvorganges erfolgte nach der in Abschn. 3.22 beschriebenen Weise. Bei den Messungen mit dem Füll- und Entleerungssystem Variante I wurden dazu drei Schwimmer in der Kammer angeordnet. Die Auswertung der drei nebeneinander aufgezeichneten Kurven ergab keine wesentlichen Unterschiede, so daß bei den Schleusungen mit den Varianten II und III die Wasserspiegeländerungen mittels des in Kammermitte liegenden Schiffes erfaßt werden konnten.

Die auf der Schreibtrommel registrierten Füllkurven wurden entsprechend dem Übersetzungsverhältnis und dem Modellmaßstab auf Naturverhältnisse umgerechnet und aufgetragen. Mit Hilfe der Füllkurve $H = f(t)$ erhält man die entsprechende Zuflußkurve punktweise aus der Beziehung:



Dabei ist es wichtig, die Größe der Zeitintervalle Δt_{ik} klein zu wählen, um möglichst genaue und eine genügende Anzahl Werte Q_{mik} zu bekommen, die einen stetigen Verlauf der aufgetragenen Zuflußkurve $Q = f(t)$ ergeben. Im allgemeinen betrug die Intervallgröße ca. 44 Sekunden entsprechend der auf der Schreibtrommel aufgetragenen 10 Sekunden-Zeitkontakte. Nur während der 1. Füllphase, wo der Anstieg der Füllkurve sehr steil verläuft, machte sich eine Intervallverkleinerung bis zu 5 Sekunden (Natur) erforderlich - vor allem bei großen Hubgeschwindigkeiten V_s der Rollkeilschütze, um

den genauen Verlauf der Zuflußkurve zu erhalten. Zwecks guter Übersicht wurden hier die Punkte Q_{mik} , die dicht beieinander liegen, nicht besonders herausgezeichnet (siehe Abb. 53). Eine Kontrolle mittels graphischer Differentiation der Füllkurve innerhalb der 1. Füllphase ergab einen übereinstimmenden Verlauf der nach dem Differenzverfahren mit kleinsten Zeitintervallen aufgetragenen Zuflußkurve.

Die untersuchte große Hubhöhe von 30 m fordert relativ hohen Schleusungszeiten, was die Aufzeichnung der Füll- und Entleerungskurven bei dem zur Verfügung stehenden Trommeldurchmesser oft erschwerte und unübersichtlich wiedergab, vor allem bei den kleinen Hubgeschwindigkeiten V_s der Verschlussorgane. Aus diesem Grunde springen das Klapp- bzw. Hubtor vor Ausspiegelung bei einer bestimmten Differenz der Wasserstände an und verkürzen somit die Schleusungszeit (Abb. 36). An Hand der in Abb. 53 dargestellten Zuflußkurve erkennt man einen kurzen steilen Anstieg nach Anspringen des Klapptores bei einer bestimmten Wasserspiegeldifferenz Δh . Nach erreichtem Maximum infolge des zusätzlichen Torzuflusses - der Wert läßt sich aus der zeitlich veränderlichen Klappenstellung und dem davon abhängigen Durchfluß mittels Differenzverfahren berechnen - fällt die Kurve stark ab; wo sie die Abszissenachse berührt ergibt sich der Wert T_{kl} , die gesamte Füllzeit beim Schleusen unter Zuhilfenahme des Klapptores für die Ausspiegelung. Die gesamte Schleusungszeit T erhält man relativ einfach aus dem Schnittpunkt des abfallenden Astes der Zuflußkurve während der 2. Füllphase, der eine Gerade sein muß mit der Abszissenachse des Koordinatensystems. Kontrollmessungen mit der Stoppuhr bis zu endgültigen Ausspiegelung ohne vorzeitiges Anspringen des Tores ergaben gute Übereinstimmung mit den erhaltenen Werten T .

Die während des Schleusungsvorganges am Modell erhaltenen Füllkurven wurden für die eingebauten Varianten I, II und III bei je 6 unterschiedlichen Hubgeschwindigkeiten der Rollkeilschütze ausgewertet und die entsprechenden Zuflußkurven aufgetragen. Diese Charakteristiken zeigen einen ähnlichen Verlauf wie u. a. die in den Anlagen 50 u. 52 wiedergegebenen. Abb. 53 stellt den Verlauf der Füll- und Zuflußkurve nach Anspringen des Klapptores dar, für die Kurven der Variante I mit einer Hubgeschwindigkeit der Verschlussorgane

$V_s = 12 \text{ mm/s}$. Sämtliche charakteristischen Werte der Füll- und Zuflußkurven aus den Modellversuchen der Varianten I bis III wurden in Graphiken ausgewertet und mit entsprechenden Werten aus theoretischen Verfahren im Abschnitt 5.22 verglichen (siehe Abb. 54 bis 59).

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick von den verschiedenen gewählten Wasserstandsdifferenzen im Ober- bzw. Unterwasser und in der Kammer, bei denen das Klapp- bzw. Hubtor zur beschleunigten Ausspiegelung während der Modellschleusungen mit herangezogen wird:

V_s (mm/s)	Füllung Anspringen des Klapptores bei Δh (m) von	Entleerung Anspringen des Hubtores bei Δh (m) von
<u>Variante I</u>		
2 - 12	0,25	0,50
<u>Variante II</u>		
2	0,30	0,70
4 - 12	0,40	0,80
<u>Variante III</u>		
2	0,30	0,90
4	0,40	1,00
6	0,50	1,10
8	0,60	1,20
10	0,70	1,30
12	0,80	1,50

Die Ausspiegelung der letzten Zentimeter unter Zuhilfenahme der Tore wird bei den Schleusen in der Natur stets angewendet. Eingehende Untersuchungen über ein zweckmäßiges Δh in Abhängigkeit von der verkürzten Schleusungszeit wurden nicht durchgeführt, Wichtiger schien es, in den Abschnitten über die Auswirkungen des Schleusungsvorganges auf die Schiffsbewegungen und damit auf die Größe der Trossenkräfte das unterschiedliche Anspringen der Tore bei vorgegebenen Δh in den Graphiken mit zu berücksichtigen.

An Hand des Ausgeführten ist ersichtlich, daß die Füllvorgänge mit ihren Folgeerscheinungen eingehend untersucht wurden. Was die Ent-

leerung der Kammer anbelangt, so wurde auf eine ausführliche Darlegung des Problems verzichtet, da dieses erst in zweiter Linie von Interesse ist. Die Entleerung erfolgt mittels einer um $1/5$ niedriger liegenden Hubzeit der Rollkeilschütze, so daß beispielsweise die Entleerungszeiten für die untersuchten Varianten ca. 15 % kleiner waren als die Füllzeiten.

5.22 Gegenüberstellung der charakteristischen Werte aus den Versuchen mit den entsprechenden Ergebnissen nach den theoretischen Methoden

In den Abb. 54 bis 59 wurden zur besseren Übersicht jeweils immer nur ein Meßpunkt an Hand der Modellversuche angegeben, da die stets wiederholten Messungen fast übereinstimmende Ergebnisse brachten und somit die Werte dicht beieinander lagen.

5.221 Maximale Steigegeschwindigkeiten des Kammerwasserspiegels

Die Werte für die max. Steigegeschwindigkeiten des Kammerwasserspiegels während des Schleusungsvorganges, die sich aus dem steilsten Anstieg der Füllkurve in einem bestimmten Zeitintervall ergaben, wurden in der Abb. 54 aufgetragen. Für die kleinste vorgegebene Hubgeschwindigkeit der Verschlußorgane von 2 mm/s liegen die Maximalwerte der drei untersuchten Varianten bei 3,5 cm/s dicht zusammen, die jedoch mit zunehmenden Hubgeschwindigkeiten streuen. Bei $V_s = 12$ mm/s ergibt sich für die Variante I $s_{\max} = 4,9$ cm/s, für die Variante II $s_{\max} = 4,6$ cm/s und für Variante III gleich 5,6 cm/s. Zum Vergleich wurden die entsprechenden Werte nach dem Verfahren der schrittweisen Ermittlung der Zuflußkurve aus dem abnehmenden Druckgefälle bei $\mu = 0,50$ (siehe Abschn. 5.12) aufgetragen und miteinander verbunden. Hier lagen für die untersuchten Hubgeschwindigkeiten die max. Steigegeschwindigkeiten des Kammerwasserspiegels zwischen 3,1 cm/s und 5,0 cm/s.

5.222 Maximaler Zufluß Q_{\max}

An Hand der Abb. 55 läßt sich der Verlauf der max. Zuflüsse Q_{\max} in Abhängigkeit von den verschiedenen Hubgeschwindigkeiten der Verschlußorgane erkennen, die sich aus den Wendepunkten der nach den Versuchsergebnissen aufgetragenen Zuflußkurven ergaben. Die größten Werte zeigt die Kurve für die Grundlauf-Variante, die kleinsten

für die Variante II. Für $V_s = 2 \text{ mm/s}$ liegen die Meßwerte der drei Varianten bei ca. $70 \text{ m}^3/\text{s}$ dicht zusammen und wachsen für die Variante III bis auf $Q_{\text{max}} = 110,5 \text{ m}^3/\text{s}$ an, für die II. Variante bis auf $Q_{\text{max}} = 91,1 \text{ m}^3/\text{s}$ bei größter untersuchter Hubgeschwindigkeit V_s . Die nach dem theoretischen Verfahren in Abschn. 5.12 mit $\mu = 0,50$ ermittelten Punkte liegen im allgemeinen zwischen denen der Varianten I und III. Desgleichen wurden die Kurven nach dem im Abschn. 5.11 abgeleiteten analytischen Verfahren für $\mu = 0,30$ und $\mu = 0,50$ aufgetragen. Diese zeigen bei den niedrig liegenden Hubgeschwindigkeiten der Rollkeilschütze kleinere Ergebnisse, bei den untersuchten größeren Hubgeschwindigkeiten z. T. erheblich höhere Werte als die Versuchsergebnisse brachten.

5.223 Zu Q_{max} gehörende Füllzeiten t_{max}

Die aus den Modellversuchen gewonnenen Füllzeiten t_{max} wurden in der Abb. 56 graphisch dargestellt. Die Meßpunkte streuen nur bei den unteren Hubgeschwindigkeiten V_s , sonst liegen sie dicht zusammen. Die an Hand des Verfahrens 5.12 aufgestellte Kurve liegt im Bereich der Meßergebnisse, die nach dem Verfahren 5.11 für $\mu = 0,35$ und $\mu = 0,50$ erhaltenen Kurven ergeben größere Werte. Außerdem wurde in der Graphik die Beziehung für t_1 eingetragen, das ist die Zeit, nach welcher der Umlaufquerschnitt zur Füllung vollkommen freigegeben ist. Daraus erkennt man, daß der größte Zufluß stets vor der vollkommenen Öffnung des Füllquerschnittes eintritt. Je kleiner die Hubgeschwindigkeit der Verschlußorgane ist, umso größer wird die Differenz zwischen t_{max} und t_1 . Bei $V_s = 12 \text{ mm/s}$ liegen die Meßwerte t_{max} nur 8 bis 10 Sekunden unter denen von t_1 .

5.224 Maximale sekundliche Zunahme des Zuflusses

In der Abb. 57 wurde die größte sekundliche Zunahme des Zuflusses während der Füllung aufgetragen; diese ergab sich aus dem steilsten Anstieg der an Hand der Versuchsergebnisse ermittelten Zuflußkurve. Sämtliche Meßpunkte liegen über den Kurven, die nach den theoretischen Verfahren 5.11 mit $\mu = 0,35$ und $\mu = 0,50$ aufgestellt wurden. Dabei zeigten die Werte von der Variante III die größten Daten, beispielsweise gleich $0,18 \text{ m}^3/\text{s}^2$ für $V_s = 2 \text{ mm/s}$ und

$0,76 \text{ m}^3/\text{s}^2$ für $V_s = 12 \text{ mm/s}$. Mit der Variante II wurden die kleinsten Ergebnisse ermittelt; für eine Hubgeschwindigkeit von 2 mm/s bzw. 12 mm/s ergab sich ein $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)$ von $0,13 \text{ m}^3/\text{s}^2$ bzw. $0,60 \text{ m}^3/\text{s}^2$. Die nach dem analytischen Verfahren 5.12 mit $\mu = 0,50$ berechnete Kurve lag bei kleinen Hubgeschwindigkeiten unter den Werten der Variante II, bei den untersuchten größeren Hubgeschwindigkeiten der Verschlußorgane zwischen den Meßergebnissen der Varianten I und II.

5.225 Füllzeit T

Die Graphik der Abb. 58 stellt die gesamte Füllzeit T in Abhängigkeit von verschiedenen Hubgeschwindigkeiten der Verschlußorgane dar. Die nach der Formel 5.13 mit $\mu = 0,50$ aufgestellte Kurve stimmt mit den entsprechenden T -Werten aus den Charakteristiken nach Verfahren 5.12 mit $\mu = 0,50$ gut überein. Dagegen brachten die Modellversuche erheblich längere Schleusungszeiten mit sich, wobei die Variante II die ungünstigsten Ergebnisse zeigte. Mit der eingebauten Variante III wurden die kürzesten Füllzeiten erzielt; zum Beispiel bei $V_s = 2 \text{ mm/s}$ betrug $T = 1970 \text{ s}$ und bei $V_s = 12 \text{ mm/s}$ war die gesamte Füllzeit gleich 1550 Sekunden. Der Unterschied zu den Ergebnissen der Variante II betrug bei der kleinsten untersuchten Hubgeschwindigkeit 25 Sekunden und bei der größten V_s gleich 140 Sekunden. Die nach der Formel 5.13 mit $\mu = 0,35$ aufgestellte Kurve liegt im Bereich der Meßpunkte, nur bei einer Hubgeschwindigkeit der Rollkeilschütze von 2 mm/s ergab sich mit $T = 2148 \text{ s}$ ein darüber liegender Wert.

An Hand der Graphik läßt sich erkennen, daß der Ausdruck für die gesamte Füllzeit T nach der Formel 5.13 bei hohem Gefälle nicht zutreffend ist. Ein μ von ca. $0,35$ dürfte für die gewählten und untersuchten Füll- und Entleerungssysteme der Varianten I, II und III zu niedrig liegen.

5.226 Dimensionsloses Verhältnis $\frac{Q_{\max}}{Q_m}$ bzw. $\frac{s_{\max}}{s_m}$

Das Verhältnis $\frac{Q_{\max}}{Q_m}$ und $\frac{s_{\max}}{s_m}$ ist für die jeweilige Hubgeschwindigkeit der Verschlußorgane nahezu gleich und wurde in der Abb. 59 graphisch dargestellt. Q_m und s_m sind dabei der mittlere Zufluß

bzw. die mittlere Steigegeschwindigkeit des Kammerwasserspiegels (siehe auch Abschn. 5.121 bis 5.126). Die Werte aus den Modellversuchen, wobei mittels Variante III die größten Verhältnisse auftraten, liegen in fast gleichem Abstand über der nach dem Verfahren 5.12 aufgestellten Kurve. Man erkennt, daß bei einer Hubgeschwindigkeit von $V_s = 6 \text{ mm/s}$ an aufwärts die Verhältnisse

$\frac{Q_{\max}}{Q_m}$ bzw. $\frac{s_{\max}}{s_m}$ jeweils für die entsprechende Variante nahezu

konstant bleiben; desgleichen die Verhältnisse, die auf Grund des erwähnten analytischen Verfahrens ermittelt wurden. Die Kurve nach dem Verfahren 5.11 mit $\mu = 0,50$, wo für die gesamte Füllzeit die Beziehung 5.13 Verwendung fand, liegt bei den größten untersuchten Hubgeschwindigkeiten im Bereich der aufgetragenen Meßpunkte, bei $V_s = 2 \text{ mm/s}$ und 4 mm/s in der Nähe der an Hand von Verfahren 5.12 ermittelten Werte.

5.3 Modellversuche über die Größe der Trossenkräfte während der Schleusung bei einem in Kammermitte liegendem Schiff

5.31 Verlauf der Trossenkräfte bei der Füllung und Entleerung mittels der drei untersuchten Varianten

Die Registrierung der Trossenkräfte für ein in der Mitte der Schleusenammer liegendes 1000 t-Kanalschiff erfolgte nach der in Abschn. 3.23 beschriebenen Methode mittels der angegebenen Meßeinrichtungen. So konnten außer den Längs Kräften auch die Querkräfte am Bug und am Heck aufgezeichnet werden (Abb. 24). Die Eichung der Blattfedern mit Gewichten und einer Federwaage zur Kontrolle ergab für je 50 g ca. 1 bis 2 cm Ausschlag. Dieser wurde stets in beiden Richtungen gemessen, wobei keine größeren Unterschiede festzustellen waren.

Der Verlauf der Trossenkräfte während einer Schleusung, wie er sich aus den Aufzeichnungen durch die Registriervorrichtungen auf dem Kymographen ergab, wurde für die drei untersuchten Varianten mit den Hubgeschwindigkeiten der Füllorgane von 6 mm/s und 12 mm/s in den Abb. 60 bis 65 dargestellt. Von den zwei- bis viermal wiederholten Messungen bei einer bestimmten Hubgeschwindigkeit der Rollkeilschütze wählte man solche Kurven aus, die die max. resultierende Trossenkraft

$$\max P_R = \sqrt{Q_{B/H}^2 + P^2} \quad (5.16)$$

brachten, wobei $Q_{B/H}$ die max. Querkraft am Bug bzw. am Heck und P die max. Längskraft während der Füllung ist. Bei der Entleerung wurden stets kleinere Kräfte registriert.

Der Kräfteverlauf ergab bei den Varianten I und II fast das gleiche Bild. Durch vor- und rückwärtiges Pendeln des Schiffes sowie schnelles Aufschaukeln treten die größten Werte kurz nach Beginn der Füllung auf. Danach klangen die Ausschläge bei den registrierten Kurven in gleicher Weise allmählich auf Null ab. Als positiver Bereich der Kurve wurde die in Richtung Heck - Bug stattfindende Wegänderung bezeichnet. Mit größer werdenden Hubgeschwindigkeiten V_s nehmen sinngemäß auch die absoluten Werte der max. Trossenkräfte zu, die bei den Längskräften stets im positiven Bereich lagen. Daneben konnten während des Füllvorganges die Auswirkungen infolge der beschleunigten Ausspiegelung mittels Klapptor auf die Längskomponenten der Trossenkräfte des vertäuten Schiffes festgestellt werden, wobei erst die an der rückwärtigen Kammerwand reflektierte erste Schwallwelle den größten positiven Ausschlag verursachte. Beim Entleeren wurde nur der Verlauf der Längskräfte wiedergegeben, da auf die Querkomponenten der Trossenkräfte keine Auswirkungen festzustellen waren, wie die entsprechenden Q -Kurven für $V_s = 12 \text{ mm/s}$ zeigen. Dabei verursachten das Abreißen des Wasserspiegels an der Hubturnische und die Sunkwelle durch das vorzeitige Anspringen des Klapptores gewisse Auswirkungen auf die Längskräfte in den Trossen. Die Ausschläge bei Beginn der Entleerung waren infolge des starken Wasserpolsters stets geringer als die eben erwähnten.

Der Betrieb mit der Grundlauf-Variante ergab einen ähnlichen Verlauf der registrierten Kurven, nur erfolgte hier ein einmaliger langsamer Federausschlag in positiver Richtung, der anschließend allmählich auf Null abklang - ohne periodischen Wechsel, wie bei den Varianten I und II. Die max. Längskräfte treten zu einem etwas späteren Zeitpunkt auf, als das bei den ersten beiden Varianten der Fall war. Während der Entleerung ergab sich ein ähnliches Bild des Kurvenverlaufes, nur waren hier die Werte viel kleiner.

5.32 Vergleich der Versuchsergebnisse untereinander und Gegenüberstellung mit den zulässigen Trossenkraften

Die Ergebnisse der Trossenkraftmessungen an einem in Kammermitte liegendem Schiff wurden bei der Schleusung mittels Variante I in der Abb. 66 dargestellt. Zur besseren Übersicht wählte man, wie auch in den Abb. 67 und 68 nur Werte von den Kurven aus, die für eine bestimmte Hubgeschwindigkeit der Verschlußorgane die max. resultierende Trossenkraft ergaben. Der Bereich dieser Maximalkräfte belief sich hier von 1,04 t bei $V_s = 2 \text{ mm/s}$ bis 2,16 t bei $V_s = 12 \text{ mm/s}$, wobei die Anteile der Quer- und Längskräfte in gleichen Größenordnungen lagen. Die Kräfte durch die größere reflektierte Schwallwelle infolge Anspringen des Klapptores bei einer Wasserspiegeldifferenz $\Delta h_K = 0,25 \text{ m}$ waren nie größer als 0,10 t. Während der Entleerung betrugen die max. Längskräfte infolge Sunk durch Anspringen des Hubtores bei einer Wasserspiegeldifferenz $\Delta h_H = 0,50 \text{ m}$ rund 0,5 t. Das Abreißen des Wasserspiegels an der Hubtornische verursachte bei den verschiedenen V_s Kräfte von 0,2 t bis 0,3 t. Schließlich wurden noch die Schleusungszeiten angegeben, wo die max. Kräfte auftraten. Die größten Längskräfte wurden stets im Bereich bis 100 Sekunden nach Beginn der Füllung registriert; die max. Querkkräfte ergaben sich erst ca. 450 Sekunden bis 100 Sekunden später, je nach den verschiedenen untersuchten Hubgeschwindigkeiten von 2 mm/s bis 12 mm/s. Die max. Längskräfte traten zu dem Zeitpunkt auf, wo die größte sekundliche Zunahme des Zuflusses erfolgte.

Die Ergebnisse der Trossenkraftmessungen für die Variante II wurde in der Abb. 67 graphisch aufgetragen. Hier zeigte die Kurve für die max. resultierenden Kräfte bei kleinen Hubgeschwindigkeiten der Verschlußorgane etwas geringere Werte und bei $V_s = 6$ bis 12 mm/s mit 1,67 t bis 2,49 t größere Werten als bei der ersten Variante. Der Anteil der Längskräfte war dabei bis rund 0,4 t größer als die entsprechenden Querkkräfte am Bug und Heck. Was die Trossenkkräfte durch den Schwall bzw. Sunk infolge des vorzeitigen Anspringens der Tore anbelangt, so ergab sich ein nur geringes Anwachsen um 0,1 t gegenüber den Kräften bei der Variante I, entsprechend der etwas höheren Wasserspiegeldifferenz $\Delta h_K = 0,40 \text{ m}$ bzw. $\Delta h_H = 0,80 \text{ m}$. Die gemessenen Kräfte infolge Abreißen des Wasser-

spiegels an der Hubtornische zeigten dieselben Ergebnisse wie die in der Abb. 66 angegebenen. Der Verlauf der zu den Maximalkräften gehörenden Zeiten war ähnlich dem bei der Variante I; auch hier traten die größten Längskräfte früher als die max. Querkkräfte auf.

In der Abb. 68 wurden die entsprechenden Trossenkräfte an Hand der Messungen mit der Grundlauf-Variante dargestellt. Die max. resultierenden Trossenkräfte lagen im allgemeinen über denen der anderen beiden Varianten; für $V_s = 2 \text{ mm/s}$ ergaben sich 0,76 t und für $V_s = 12 \text{ mm/s} = 3,08 \text{ t}$. Hier traten die Längskraftanteile stark hervor und waren nur ca. 0,1 t kleiner als die dazu gehörenden resultierenden Kräfte. Die Querkkräfte lagen bei allen untersuchten Hubgeschwindigkeiten stets unter 0,5 t. Die durch das vorzeitige Öffnen der Tore verursachten Trossenkräfte zeigten entsprechend der erhöhten Wasserspiegeldifferenzen, die auch untereinander variierten, größere Werte. Dabei betrugen die Kräfte infolge Anspringen des Hubtores bei Δh_H bis 1,50 m nicht mehr als 0,7 t, was in dem langsamen Anheben des Tores begründet ist (der erste Hub von 60 cm wird in einer Zeit von 160 Sekunden überwunden). Die Kräfte infolge Abreißen des Wasserspiegels an der Hubtornische lagen auch hier in der Größenordnung von 0,2 bis 0,3 t. Die graphische Darstellung der zu den max. Trossenkräften gehörenden Zeiten ergaben bei der Variante III ein etwas anderes Bild. Hier traten die größten Längs- und Querkkräfte fast zum gleichen Zeitpunkt auf. Die einzelnen Werte lassen sich aus der Graphik bestimmen; die Zeiten nahmen, vom Füllungsbeginn an gerechnet, mit wachsenden Hubgeschwindigkeiten der Rollkeilschütze ab.

Die max. resultierenden Trossenkräfte aus den Längs- und Querkomponenten wurden für die drei untersuchten Füll- und Entleerungssysteme in der Abb. 69 aufgetragen. Es ergaben sich, wie schon erwähnt, für die in der Praxis gebräuchlichen Hubgeschwindigkeiten V_s bei der Variante III die größten und bei der Variante I die kleineren Kräfte. Daneben wurden zum Vergleich die zulässigen Trossenkräfte nach zwei verschiedenen Beziehungen angegeben. In Deutschland besteht nach [10] und [15] für die zulässigen Trossenkräfte die Forderung:

$$P_{zul} = \left(\frac{1}{600} \text{ bis } \frac{1}{750} \right) \cdot G_s \quad (5.17)$$

G_s ist das Schiffsgewicht, das bei einem beladenen 1000 t-Kanalschiff ca. 1280 t beträgt. An Hand der Formel 5.17 ergibt sich eine zulässige Trossenkraft im Durchschnitt von $P_{zul} = 2,0 \text{ t}$.

Bei einer Studienreise durch die CSSR [32] konnte festgestellt werden, daß die tschechoslowakischen Kollegen die von MICHAÏLOW angegebene Formel [33] verwenden:

$$P_{zul} = \left(\frac{1}{20 w^{2/5}} \right) \cdot L_s \quad (5.18)$$

L_s ist die Ladefähigkeit des in Frage kommenden Schiffes, im vorliegenden Falle gleich 1000 t. Mit w wird die Wasserverdrängung des Schiffes bezeichnet, die bei einer Ladung von 1000 t ungefähr 1280 t beträgt. Somit ergibt sich eine zulässige Trossenkraft von $P_{zul} = 2,8 \text{ t}$.

6. Hydrodynamische Vorgänge in den Vorhäfen beim Füllen und Entleeren der Schleusenkammer

In diesem Abschnitt werden die Schwall- und Sunkerscheinungen infolge des Schleusungsvorganges sowie die Auswirkungen auf die Trossen der im Ober- bzw. Unterhafen vertäuten Schiffe behandelt. Es ist geplant, dieses Problem ausführlich in einem besonderen Thema über Schwall und Sunk in den Schleusenvorhäfen zu bearbeiten. Die hierbeschriebenen Modelluntersuchungen wurden mit eingebautem Füll- und Entleerungssystem der Variante I durchgeführt.

6.1 Sunk und Schwall in den Vorhäfen als Folgeerscheinungen des Schleusungsvorganges

Bei der Füllung einer Schleusenkammer aus dem oberen Vorhafen sinkt der Wasserspiegel im oberen Vorhafen durch die Entnahme des Füllwassers zunächst unmittelbar an der Einlaufstelle ab. Dadurch entsteht ein Niveauunterschied zwischen dem Wasserspiegel im Vorhafen und dem der Entnahmestelle, dessen Folge eine Fließbewegung in Richtung auf die Schleusenkammer ist. Das Wasserspiegelgefälle pflanzt sich dabei mit einer bestimmten Wellengeschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung fort. Das Maß z der Wasserspiegelabsenkung, die sog. Sunktiefe hängt von der Größe des Zuflusses Q , der breite des Entnahmequerschnittes und von der Wellengeschwindigkeit w ab. Die Erscheinung wird als Entnahmesunk be-

zeichnet.

Bei der Entleerung der Kammer tritt im unteren Vorhafen ein Füllschwall auf. Das Maß z der Wasserspiegelerhebung im Vorhafen wird als Schwallhöhe bezeichnet, diese bewegt sich in Fließrichtung fort.

6.11 Analytische Bestimmung der Sunktiefen und Schwallhöhen mit den dazugehörigen Geschwindigkeiten

In den nachfolgenden Berechnungsformeln bedeuten:

z = Sunktiefe bzw. Schwallhöhe in (m)

w = Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Sunk- bzw. Schwallwelle in (m/s)

B_0 = Wasserspiegelbreite vor Eintreffen der Welle in (m)

B = Wasserspiegelbreiten entsprechend z in (m)

$B_m = 1/2 (B_0 + B)$ = mittlere Wasserspiegelbreite in (m)

F = Querschnitt des Gerinnes vor Eintreffen der Welle in (m²)

6.111 Berechnung nach der herkömmlichen Methode

Aus der Bedingung für die Raumgleichheit der in der Zeiteinheit dem Vorhafen entnommenen und der Schleusenkammer zugeflossenen Wassermenge ΔQ folgt nach [29]:

$$\Delta Q = z \cdot B_m \cdot w$$

und daraus:

$$z = \frac{\Delta Q}{w \cdot B_m} \quad (6.1)$$

Für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit w der Sunkwelle ist in der neueren Literatur die über den Impulssatz abgeleitete Formel:

$$w = \sqrt{g \left(\frac{F}{B_m} - \frac{3}{2} z + \frac{B_m \cdot z^2}{2 \cdot F} \right)} \quad (6.2)$$

am gebräuchlichsten. Sie gilt exakt für Profile mit senkrechten Wandungen und mit ausreichender Genauigkeit für alle Trapez- und ähnlichen Profile. Bei kleinen Sunktiefen z wird das 3. Klammerglied unter der Wurzel bei Gleichung (6.2) vernachlässigbar gering, so daß mit ausreichender Genauigkeit

$$w = \sqrt{g \left(\frac{F}{B_m} - \frac{z}{2} \right)} \quad (6.3)$$

gesetzt werden kann. Für überschlägige Berechnungen genügt es, mit

$$W = \sqrt{g \left(\frac{F}{B_m} \right)} \quad (6.4)$$

zu rechnen.

Beim Füllschwall im Unterhafen während des Entleerungsvorganges haben die gleichen abgeleiteten Beziehungen, absolut genommen, Gültigkeit.

Die Formel (6.4) wird zunächst angewendet, um auf die übliche Weise die Größen für den Sunk und Schwall zu bestimmen [31]. Darauf berechnet man z an Hand der Beziehung (6.1) und setzt diesen Wert in Gleichung (6.2) ein, wonach sich ein neues verbessertes w ergibt. Weichen beide Ergebnisse voneinander ab, so ist der Rechnungsgang mit dem zuletzt erhaltenen w zu wiederholen und so lange fortzusetzen bis beide Werte fast übereinstimmen.

Die Berechnungen wurden für die Querschnitt (1-1) und (2-2) durchgeführt, und zwar bei einer festgelegten Wassertiefe von 3,50 m. Der erstgenannte Querschnitt liegt an der Stelle, wo das trichterförmige Leitwerk im Vorhafen beginnt. Hier ist der gesamte Vorhafenquerschnitt mit $F = 325,5 \text{ m}^2$ wirksam, wobei $B_m \approx 58,50 \text{ m}$. Der andere Querschnitt (2-2) befindet sich an der Schleuseneinfahrt, also am Ende des trichterförmigen Leitwerkes. Hier beträgt $F = 42,0 \text{ m}^2$ bei einem $B_m = 12,00 \text{ m}$. Ein- und Auslaßöffnungen der Schachtschleuse liegen also zwischen den betrachteten Querschnitten (1-1) und (2-2).

Die Ergebnisse der analytischen Berechnung wurden für verschiedene Zu- und Abflüsse tabellarisch im Abschnitt 6.113 angegeben.

Bei dieser wie der im folgenden Abschnitt behandelten Berechnungsmethode wurde ein plötzliches Öffnen der Verschlußorgane vorausgesetzt, was in Wirklichkeit nicht der Fall ist. Man erhält etwas größere Beträge und liegt somit auf der sicheren Seite.

6.112 Berechnung auf Grund dimensionsloser Kenngrößen

Wie aus dem Vorhergehenden ersichtlich, ist es üblich, die Schwall- und Sunkvorgänge in offenen Kanälen iterativ zu berechnen. Durch

Verwendung von Nomogrammen kann dieses vereinfacht werden. Außerdem kann man für relativ kleine Schwallhöhen z das Glied

$\frac{B_m \cdot z^2}{2 \cdot F}$ und oft sogar das Glied $\frac{3}{2} z$ vernachlässigen, wodurch die Bestimmungsgleichung für w besonders einfach wird.

Auf der Grundlage von dimensionslosen Kenngrößen wurde in [34] ein Berechnungsverfahren für Schwall- und Sunkvorgänge in prismatischen offenen Gerinnen entwickelt. Es werden hier vom Maßsystem unabhängige, allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten aufgestellt, mit denen ohne Vernachlässigungen die Schwall- und Sunkerscheinungen in offenen Kanälen direkt berechnet werden können. Das Verfahren ist allgemein gültig für Kanäle beliebiger Querschnittsform. Die Gleichungen sind in Form von Diagrammen ausgewertet worden, mit denen Schwall- und Sunkgeschwindigkeit und Schwall- und Sunkhöhe übersichtlich und schnell bestimmt werden können.

Die nach diesem Verfahren für verschiedene Zu- bzw. Abflüsse berechneten Werte wurden im folgenden Abschnitt ebenfalls tabellarisch angegeben.

6.113 Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Berechnungsverfahren

Die nach den beiden analytischen Verfahren berechneten Größen z und w wurden bei der Schleusung einmal für den Entnahmesunk und zum anderen für den Füllschwall in nachfolgender Tabelle zusammengestellt. Unter Verfahren a wird die Berechnung nach der herkömmlichen Methode verstanden, unter Verfahren b die auf Grund dimensionsloser Kenngrößen.

Entnahmesunk

Durchfluß Q (m ³ /s)	Querschnitt 1-1				Querschnitt 2-2			
	Verfahren a		Verfahren b		Verfahren a		Verfahren b	
	- z (m)	w (m/s)	- z (m)	w (m/s)	- z (m)	w (m/s)	- z (m)	w (m/s)
5			0,01	7,50			0,07	5,95
10			0,02	7,75			0,15	5,53
20			0,04	7,62			0,30	5,53
30			0,07	7,67			0,48	5,21
40	0,09	7,33	0,09	7,62	0,66	5,02	0,66	5,01
50	0,12	7,30	0,12	7,29	0,87	4,78	0,87	4,76
60	0,14	7,28	0,14	7,36	1,09	4,55	1,09	4,58
70	0,16	7,28	0,17	7,17	1,46	3,99	x)	x)
80	0,19	7,24	0,19	7,03	1,80	3,50	x)	x)
90	0,22	7,17	0,21	7,26			x)	x)
100	0,24	7,20	0,23	7,31			x)	x)
110	0,26	7,14	0,26	7,19			x)	x)
120	0,28	7,39	0,29	7,10			x)	x)

x) Ablesung aus den Diagrammen nicht mehr möglich.

Füllschwall

Durchfluß Q (m ³ /s)	Querschnitt 2-2				Querschnitt 1-1			
	Verfahren a		Verfahren b		Verfahren a		Verfahren b	
	+ z (m)	w (m/s)	+ z (m)	w (m/s)	+ z (m)	w (m/s)	+ z (m)	w (m/s)
5			0,07	5,95				
10			0,14	5,95				
20			0,27	6,39				
30			0,40	6,21				
40	0,51	6,48	0,51	6,48	0,09	7,44	0,09	7,18
50	0,63	6,63	0,62	6,68	0,11	7,47	0,11	7,65
60	0,74	6,75	0,74	6,80	0,14	7,50	0,13	7,67
70	0,85	6,88	0,84	6,94	0,16	7,52	0,15	7,68
80	0,95	7,00	0,95	7,00	0,18	7,53	0,18	7,69

Wie ersichtlich, weichen die Ergebnisse beider Verfahren nur unwesentlich voneinander ab. Die Sunkttiefen z zeigen dabei, absolut genommen, höhere Werte als die entsprechenden Schwallhöhen im Unterwasser. In der Graphik der Abb. 70 wurden die max. Sunkttiefen für die beiden betrachteten Querschnitt aufgetragen, es genügte daher, jeweils nur einen Wert anzugeben. Über die Schwall- und Sunkgeschwindigkeiten w werden im Rahmen dieser Arbeit keine weiteren Betrachtungen durchgeführt.

6.12 Angabe der Sunkttiefen und Schwallhöhen auf Grund von Modellversuchen und Vergleich mit den Ergebnissen nach analytischer Berechnung

Während des Schleusungsvorganges wurden die Sunkttiefen im Oberhafen mit Hilfe von 3 Schwimmern und die Schwallhöhen im Unterhafen mittels 2 Schwimmer gemessen und registriert. Anordnung und Meßmethode ist im Abschnitt 3.21 beschrieben und in der Abb. 24 dargestellt. Die an Hand der Auswertungen erhaltenen Maximalwerte wurden in der Abb. 71 für die verschiedenen Hubgeschwindigkeiten der Verschlußorgane aufgetragen. Der Entleerungsvorgang erfolgte

in einer um 20 % kürzeren Zeit; damit betrugen die vorgegebenen Hubgeschwindigkeiten $V_s = 2,5 \text{ mm/s}$ bis $V_s = 15 \text{ mm/s}$. Auch hier waren die Sunktiefen z größer als die entsprechenden absoluten Werte für den Füllschwall. Deshalb sollen sich die vergleichenden Untersuchungen nur auf den Entnahmesunk beschränken. Am Schwimmer 3 unmittelbar an der Entnahmestelle wurden beispielsweise bei der größten vorkommenden Hubgeschwindigkeit von $V_s = 12 \text{ mm/s}$ max. Sunktiefen von 41,0 bis 42,5 cm gemessen. Weitere Werte sind aus der erwähnten Graphik leicht zu entnehmen. Wie aus den Charakteristiken ersichtlich, ergibt sich für jede Schleusung ein bestimmtes Q_{max} (m^3/s), dem wiederum eine entsprechende Sunktiefe z an einer bestimmten Stelle im Oberhafen zugeordnet werden kann. Für diese Beziehung $z = f(Q_{\text{max}})$ an der Entnahmestelle (Schwimmer 3), die zwischen den Querschnitten 1-1 und 2-2 liegt, wurden die Maximalwerte z in die Abb. 70 vergleichsweise mit eingezeichnet. Diese liegen zwischen den aufgetragenen Punkten, die nach den analytischen Verfahren für die Querschnitte 1-1 und 2-2 ermittelt wurden. Außerdem erkennt man, daß sich bei der Berechnung entsprechend der Annahme eines plötzlichen Öffnens der Verschlußorgane erheblich größere Werte ergaben.

6.2 Trossenkräfte eines in den Vorhafen am ungünstigsten Liegeplatz wartenden Schiffes

Die ungünstigste Liegestelle eines im Vorhafen wartenden Schiffes ist aus Abb. 24 ersichtlich. Diese wurde so gewählt, daß das Schiff noch am ersten Dalben festmachen kann, ohne ein vorbeifahrendes zu stören (Abb. 26). Damit ergab sich im Oberhafen eine Entfernung vom Bug bis zur ersten Einlauföffnung von 26,60 m und im Unterhafen eine entsprechende Entfernung von der letzten Auslaßöffnung bis zum Bug von 38,60 m.

6.21 Maximale Kräfte nach analytischer Berechnung

Die beim Durchlaufen einer Sunkwelle auf das Schiff wirkende Gesamtkraft setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, der Neigungskraft und der Strömungskraft. Nach [29] ist die Größe der Strömungskraft gegenüber der Neigungskraft vernachlässigbar gering.

Unter der Annahme, daß bei allen im Schleusenvorhafen entstehenden Sunkwellen die Länge der Sunkwellenfront größer als die übliche Schiffslänge ist, gilt folgende Beziehung für die Neigungskraft:

$$S_N = G_S \cdot J_W \quad (6.5)$$

G_S ist das Bruttoschiffsgewicht, welches bei einem 1000 t-Kanalschiff rd. 1280 t beträgt. Mit J_W wird das Wasserspiegelgefälle bezeichnet. Dieses läßt sich beispielsweise im Oberhafen an Hand der ermittelten Sunktiefen bei den Schwimmern 2 und 3, die 30,0 m (i.Natur) voneinander entfernt sind und zwischen denen das Schiff liegt, leicht angeben. Die max. Längskomponente der Trossenkraft ist somit identisch mit der Neigungskraft bei der größten Wasserspiegelneigung J_W während eines Schleusungsvorganges. Die Ergebnisse wurden für die verschiedenen max. Schleusenzuflüsse Q_{\max} in der Abb. 73 aufgetragen. Bei einer Hubgeschwindigkeit der Verschlußorgane von beispielsweise $V_S = 12 \text{ mm/s}$ und einem $Q_{\max} = 97,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ergaben sich Trossenlängskräfte mit 2,98 t, 3,2 t und 3,42 t. Das modellmäßig gemessene Wasserspiegelgefälle lag hier in den Grenzen zwischen 0,00233 und 0,00267.

6.22 Maximale Kräfte auf Grund von Modellversuchen und Vergleich mit den Ergebnissen nach der analytischen Berechnung

Die Messung und Registrierung der Trossenkräfte eines im Oberhafen bzw. Unterhafen liegenden Schiffes erfolgte nach der gleichen Methode wie die Aufzeichnung der Längskräfte eines in Kammermitte vertäuten Schiffes und ist in Abschn. 3.23 ausführlich beschrieben worden (Abb. 26). Der Verlauf der Trossenkräfte während des Schleusungsvorganges bei den verschiedenen vorgegebenen Hubgeschwindigkeiten der Verschlußorgane zeigte ein ähnliches Bild wie die registrierten Kurven für die Längskräfte eines in der Kammer liegenden Schiffes. (beispielsweise siehe Abb. 60 u. 61). Die Maximalwerte davon wurden in der Abb. 72 graphisch angegeben, daneben die max. Kräfte, die durch vorzeitiges Betätigen der Torverschlüsse zur beschleunigten Ausspiegelung auftraten. An Hand der Graphik läßt sich sagen, daß die Trossenkräfte durch den Entnahmesunk im Oberhafen erheblich höher liegen als die entsprechenden Kräfte infolge des Füllschwallis im Unterhafen. Bei der Kammerfüllung z. B. mit $V_S = 12 \text{ mm/s}$ wurden an dem im Oberhafen liegendem Schiff

Trossenkräfte bis 2,58 t gemessen; bei der um 20 % schnelleren Entleerung ($V_s = 15 \text{ mm/s}$) dagegen im Unterhafen nur bis 1,92 t. Ferner erkennt man, daß die gemessenen max. Kräfte im Oberhafen größer sind als die max. resultierenden Trossenkräfte eines in Kammermitte liegenden Schiffes während desselben Füllvorganges, desgleichen die max. Kräfte durch das vorzeitige Ausspiegeln mit Hilfe des Klapptores. Die entsprechenden max. Kräfte durch den Füllschwall im Unterhafen zeigten dagegen etwas kleinere Werte, die max. Kräfte infolge des vorzeitigen Anspringens des Hubtores lagen in derselben Größenordnung wie bei dem in der Kammer befindlichen Schiff. Die zahlenmäßigen Angaben lassen sich aus den entsprechenden Graphiken entnehmen. In der Abb. 73 wurden außerdem die max. Trossenkräfte, die durch den Entnahmesunk am Schiff im Oberhafen entstehen, bei verschiedenen Kammerzuflüssen aufgetragen. Zum Vergleich mit den berechneten Werten an Hand der Neigungskraft ergaben sich ca. 0,2 t bis 0,6 t kleinere Versuchswerte.

Abschließend wurde auf der Abb. 74 die max. Trossenkraft eines im Vorhafen wartenden 1000 t-Regelkahnes in Abhängigkeit von der Wellenneigung und der Trossenlänge nach [29] wiedergegeben. Die Berechnung erfolgte auf Grund der angegebenen Gleichung. Als Elastizitätsmodul für die Trosse wurde $E = 1100 \text{ t/cm}^2$ angenommen, als Vorspannkraft einheitlich für alle Trossenlängen $P_0 = 30 \text{ kg}$ gewählt. Das Diagramm zeigt, daß die Größe der max. Trossenkraft mit der Wellenneigung J_w zunimmt. Die Zunahme der Trossenkraft ist dabei umso stärker, je länger die Trosse ist. Die Trossen sollen deshalb möglichst kurz und straff gehalten werden, da dann die Bewegungsmöglichkeit des Schiffes nur gering ist und damit die Größe der Kraftspitzen in den Trossen in zulässigen Grenzen bleibt. In der Praxis betragen die Trossenlängen beim Festlegen des Schiffes an den Dalben im Mittel zwischen 4,0 und 8,0 m. Ihre jeweilige Länge wird dabei durch die Lage der Dalben und Schiffspoller zueinander bestimmt.

7. Schlußbetrachtungen

Die Arbeit zeigt an Hand der durchgeführten Untersuchungen, daß es möglich ist, große Fallhöhen von 30,0 m und mehr mit Hilfe einer Schleuse zu überwinden, ohne die zulässigen Trossenkräfte zu überschreiten bzw. die Schleusungszeiten zu sehr auszudehnen. Dabei ergaben sich für die untersuchten drei Varianten mit den gewählten Abmessungen bei einer vorgegebenen mittleren Hubgeschwindigkeit der Verschlußorgane von ca. 8 mm/s die brauchbarsten Daten. Diese lassen sich noch verbessern, wenn man den ersten Füllschwallen energisch begegnet, die auch die größten Trossenkräfte zur Folge haben und innerhalb der ersten Füllphase auftreten, wo die größte sekundliche Zunahme des Zuflusses stattfindet. Einmal könnte der Schützhub der Verschlußorgane mit zwei verschiedenen Geschwindigkeiten betätigt werden: Zunächst mit $v_s = 6$ bis 8 mm/s bis der gefährliche anfängliche Füllschwall überwunden ist und anschließend mit einer sehr großen Hubgeschwindigkeit der Verschlußorgane, beispielsweise zwischen 15 und 30 mm/s. Letztere hat durch das starke Wasserpolster keine Auswirkungen auf das in der Kammer liegende Schiff. Zu diesem Ergebnis kommt auch REIPLINGER [41], indem er mittels analytischer Abschätzung zeigt, daß wohl am Beginn der 1. Phase des Füllvorganges ein lineares Öffnungsgesetz vorteilhaft erscheint, es aber nicht günstig ist, dieses bis zum Ende der Öffnungszeit t_1 beizubehalten. Zu große Füllquerschnittsflächen wären die Folge - unter Einhaltung einer minimalen Füllzeit mit den entsprechenden zulässigen Trossenkräften - und stellen keine gute Lösung dar. Zweckmäßiger ist es, das Verschlußorgan zunächst sehr langsam und gleichmäßig zu heben. Anschließend daran kann dann rascher - gleichmäßig oder auch ungleichmäßig - jeweils den gegebenen örtlichen Verhältnissen innerhalb der 1. Füllphase weiter geöffnet werden. Zum anderen können auch bauliche Maßnahmen zum Ziel führen. Beispielsweise sind in dem sowjetischen Fachbuch [35.] u. a. bewährte Füll- und Entleerungssysteme bei großen Fallhöhen angegeben. Darin ist ein interessantes System beschrieben, wo zunächst eine Kammer im Oberdrempel gefüllt wird, die den ersten unbeliebten Füllschwall abschwächt, um dann ihr Wasser in die eigentliche Schleusenammer verhältnismäßig ruhig abzugeben. Die angegebenen Füll- und Entleerungssysteme bestehen meistens aus Grundläufen.

Die Modellversuche ergaben für die Variante III die besten Werte. Das heißt aber nicht, daß die Grundlauf-Variante auch ökonomisch gesehen die beste Lösung darstellt. Grundläufe sollen bekanntlich nur bei sehr breiten Schleusen und gutem Baugrund angewendet werden, außerdem sind sie stets teurer als die anderen Systeme. Daher müßte erst einmal die Variante I vom baulichen Standpunkt aus eingehend untersucht werden, da sie bei den hydraulischen Versuchen auch relativ gute Ergebnisse zeigte. Beispielsweise könnten vor die Austrittsöffnungen der Stichkanäle angebrachte parallel zur Kammerachse verlaufende Leitwände dazu beitragen, die bei der Füllung auftretenden großen Querkräfte abzuschwächen und somit die Charakteristik zu verbessern. Ferner müßten auch die Querschnittsabmessungen noch weiter variiert werden. Erst dann wären konkrete Angaben über die Zweckmäßigkeit der einzelnen Füll- und Entleerungssysteme angebracht.

Die Ausführungen in Abschnitt 6 zeigen, daß während einer Schleusung auch die Vorgänge mit den Auswirkungen in den Vorhäfen betrachtet werden müssen. Oft sind hier die Trossenkräfte des an einem ungünstigen Platz liegenden Schiffes größer als die entsprechenden Kräfte eines in der Kammer wartenden Schiffes. Bei den Modellversuchen traten die größten Trossenkräfte an einem im Oberhafen liegendem Schiff auf und sind eine Funktion der Ausbildung, Lage und Größe der Einlauföffnungen. Zur Erreichung der optimalen Lösung wäre auch hier die Untersuchungen mehrerer Varianten erforderlich.

Während der Schleusung müssen vor allem die Probleme der Wassersparnis in Betracht gezogen werden, da sonst der Wasserverlust bei dem großen Kammerinhalt enorm ist. Hier wären Untersuchungen über die Anzahl und die zweckmäßigste Anordnung von Sparbecken ratsam, um den Wasserverbrauch beim Füll- und Entleerungsvorgang auf ein Minimum herabzudrücken. Bei den großen amerikanischen Flußschleusen spielt bekanntlich der Wasserverlust keine Rolle. Die angeführten Faktoren zeigen, daß vorrangig die Art der Schiffshebeanlage zu wählen ist. Neben den Schleusen unterscheiden wir senkrechte Hebewerke, geneigte Ebenen mit Längs- und Querförderung und senkrechte Hebewerke als Treppe mit kurzen Zwischenhaltungen, die alle ohne bzw. fast ohne Wasserverlust

arbeiten. In [42] wurde eine ausführliche Zusammenstellung dieser bisher gebauten Anlagen gegeben und Hinweise für die Gestaltung neuer Bauwerke erarbeitet. DIETRICH [43] stellte vergleichende Betrachtungen über die zweckmäßigste Art der verschiedenen Abstiegsbauwerke an. Durch Vergleichsrechnungen ermittelte er allgemeingültige Werte über die Leistungsfähigkeit, den Zeitaufwand zur Überwindung der Hubhöhe für verschiedene Schiffe, den Wasserbedarf in Abhängigkeit von den Haltungslängen und die Geländeneigung. Somit wird eine Vergleichbarkeit mehrerer Vorschläge für die entsprechende Schiffshebeanlage ermöglicht. Da diese Vergleichsrechnungen für Hubhöhen zwischen 20 m und 120 m durchgeführt wurden, lassen sich in bezug auf die angegebenen Bedingungen schon gewisse Vorentscheidungen bei der Aufstellung von Vorentwürfen treffen.

Bei der Projektierung zukünftiger Schleusen ist daneben auch die Ökonomik zu berücksichtigen. MÄSIAR [36] fordert z. B., daß stets das ökonomische Problem zuerst zu lösen ist. Man muß für die betreffende Wasserstraße untersuchen, was für eine Verkehrsdichte vorhanden ist und was für Schiffsarten darauf verkehren (Schubboote, Selbstfahrer, Schleppzüge). Danach werden die Abmessungen der Kammer festgelegt und zum Schluß wird das hydraulisch günstige Füllsystem bestimmt. Kammerabmessungen von 30 m x 230 m können mit den üblichen Füllsystemen noch gut bewältigt werden.

Die Berücksichtigung der angeführten Gesichtspunkte sowie die Bearbeitung der noch offenstehenden Fragen dieses Problems werden es ermöglichen, bei einem Schleusenprojekt mit großem Gefälleunterschied ein Bauwerk nach den neuesten baulichen, hydraulischen und wirtschaftlichen Erkenntnissen zu errichten.

Literaturverzeichnis

- [1] VOLLMER, P.: Über die Entwicklung im Bau von Binnenschiffahrtsschleusen in Deutschland. Studien zu Bau- und Verkehrsproblemen der Wasserstraßen. Herausgegeben vom Bundesverkehrsministerium; Offenbach am Main 1949
- BAW [2] RALPH, L. u. BLOOR, M.: Lock sizes for inland waterways. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, New York, Bd. 76 (1950), H. 1, T. 1
- [3] BLASIUS, H.: Berechnung der Kräfte, die die Schiffe in Schleusenammern durch das Winströmen des Wassers erfahren. Glasers Ann. 1912
- [4] KREY, H.: Neuere Versuche für Schiffsschleusen. Zentralblatt d. Bauverw. 1914
- [5] WINKEL, R.: Die hydromechanischen Vorgänge beim Schleusen eines Schiffes. Bautechnik 1923
- [6] WINKEL, R.: Die Wasser- und Schiffsbewegungen beim Schleusenbetrieb mit langen und kurzen Umläufen. Zentralblatt d. Bauverw. 1924
- [7] WINKEL, R.: Die Schleusungsdauer bei langsamen Zuflüssen. Zentralblatt d. Bauverw. 1925
- BAW [8] SCHÄFER, A.: Das neuzeitliche Füllen und Entleeren von Kammerschleusen. Bautechnik 1939
- [9] BURKHARDT, E.: Die hydraulische Entwicklung der Kammerschleuse. Bautechnik 1949
- BAW [10] WITTMANN, H. u. BLEINIS, W.: Hydromechanische Vorgänge bei der Schleusenfüllung. Studien zu Bau- und Verkehrsproblemen der Wasserstraßen. Herausgegeben vom Bundesverkehrsministerium; Offenbach a.M. 1949
- BAW [11] WICKERT, G.: Abhängigkeit und Größe der Schiffskräfte bei Kammerfüllung durch das Obertor mit tiefliegendem Drempel. Dissertation, TH Karlsruhe 1951

- [12] BLEINES, W.: Die Schleusenfüllung als Schwingungsproblem.
Dissertation, TH Karlsruhe 1943
- [13] LAUFER, M.: Modellversuche an einer Binnenschiffahrtsschleuse ohne Sparkammern mit großem Gefälle.
Zeitschrift für Bauwesen 1931,
H. 3 und Zentralblatt der Bauverwaltung
1931, Nr. 25
- [14] WÜSSNER, O.: Das Füllen von Schleusen durch Längskanäle mit Stichkanälen.
Die Wasserwirtschaft 1951, Nr. 10 BAW
- [15] DEHNERT, H.: Schleusen und Hebewerke
Springer-Verlag Berlin/Göttingen/
Heidelberg, 1954 BAW
- [16] PRESS, H.: Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen.
Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1956 BAW
- [17] CHLUM, A.: Wasserwirtschaftlicher Ausbau der Vltava.
Prag 1961
- [18] DUMAS, F.: Canal locks of the northern region and the Rhone.
The Dock and Harbour Authority, Bd. 31
(1950) Nr. 359
- [19] BUNNIES: Die Schleuse von St. Pierre.
Bauingenieur 1953, H. 4 BAW
- [20] WICKERT, G.: Der Rhône-Seitenkanal Donzère-Mondragon.
Hansa 1953, S. 1441
- [21] GRIFFIN, M.: Influence of model testing on lock design.
Proceedings of the American Society of Civil Engineers, New York, Bd. 76
(1950) H. 1, T. 1 BAW
- [22] Hafenbautechn. Gesellschaft Handbuch für Hafenbau und Umschlagstechnik.
Hansa-Verlag 1953 BAW
- [23] WICKERT, G.: Die größte Schachtschleuse der Welt.
Hansa 1954, S. 1719
- [24] EMMONS, W.F. u. LAVIK, O.: Deepening of Wilson Lock eliminates third lockage.
Journal of the Waterways and Harbours Division, Proceed. Americ. Soc. Civ. Engrs.,
Bd. 85, Nr. WW3, Sept. 1959, Teil 1 BAW

- BAW [25] WEHR SCHÜTZ, F.: Füll- und Entleerungssysteme von Schiffsschleusen mit großen Fallhöhen. Mitt. d. Inst. f. Wasserwirtschaft, Grundb. u. konstr. Wasserbau der TH Graz, 1962, H. 7
- BAW [26] SCHMIDT, M.: Gerinnehydraulik. Bauverlag Wiesbaden, 1957
- BAW [27] SCHOKLITSCHE, A.: Handbuch des Wasserbaues. Springer-Verlag Wien, 1960
- BAW [28] KNAPP, F.H.: Ausfluß, Überfall und Durchfluß im Wasserbau. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1960
- [29] PARTENSCHKY, H.W.: Der Einfluß der Schleusenfüllungen auf den Wasserstand und die Schifffahrt in einer Kanalhaltung. 144. Arbeit aus dem Th.-Rehbock-FlußbauLaboratorium d. TH Karlsruhe 1957
- [30] HOFFMANN, W.: Studien zum Thema "Füllen und Leeren von Schleusen". Wissensch. Zeitschr. d. Hochschule f. Verkehrswesen Dresden; 5 (1957) H. 4
- BAW [31] STROCK, O.: Grund- und Wasserbau in praktischen Beispielen, II. Bd. Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1950
- [32] Bericht über die TWZ-Reise in die CSSR vom 18.11. - 2.12.1962. Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin (unveröffentlicht)
- [33] МИХАЙЛОВ, А.Б. ГОЛОВНЫЕ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ И ИХ РАСЧЕТ ИЗДАТЕЛЬСТВО МИНИСТЕРСТВА РЕЧНОГО ФЛОТА СССР, МОСКВА 1951
- MICHAÏLOW, A.B. Hauptfüllsysteme von Schiffsschleusen und ihre Berechnung Verlag d. Min. d. Binnenflotte der UdSSR, Moskau 1951
- BAW [34] GROSNER, W.: Schwall, Sunk und Wassersprung. Der Bauingenieur 1960, H. 8
- [35] КАЧАНОВСКИЙ, Б.Д. ГИДРАВЛИКА СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ ИЗДАТЕЛЬСТВО МИНИСТЕРСТВА РЕЧНОГО ФЛОТА СССР, МОСКВА 1951
- BAW KAČANOVSKIJ B.D. Hydraulik der Schiffsschleusen Verlag d. Min. d. Binnenflotte der UdSSR, Moskau 1951

- [36] MÄSIAR, K.: Hlavné spôsoby zvyšovania doprovnej
vykonnosti vodnej cesty
Vydavateľstvo Slovenskej Akadémie
Vied, Bratislava 1962
- [37] BÖHMER, H.: Das Donaukraftwerk Aschach.
Die Wasserwirtschaft 1962, H. 8 BAW
- [38] Die Rhône-Staustufe Montélimar.
Die Wasserwirtschaft 1956, H. 8 BAW
- [39] WOBUS, G.: Das Wasserkraftwerk bei Stalingrad
im Vollbetrieb.
Wasserwirtschaft-Wassertechnik 1961
H. 7
- [40] RICHARDSON, G.: Navigation Lock at Ice Harbour.
The Dock and Harbour Authority;
1964, März-Heft
- [41] REITTLINGER, J.: Beitrag zum Schleusenfüllungsvorgang.
Österr. Wasserwirtschaft 1964, H. 1/2 BAW
- [42] SIMONS, H.: Über die Gestaltung von Schiffshebe-
werken.
Mitt. d. Franz.-Inst. d. TH Hannover,
H. 11, Hannover 1957 BAW
- [43] DIETRICH, E.: Untersuchungen über die zweckmäßig-
ste Ausbildung von Schiffshebeanla-
gen unter besonderer Berücksichtigung
des Betriebes und des Wasserhaushaltes.
Forschungsarbeit 1963 (unveröffentl.)

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1 Speicherschachtschleuse Minden i.W.
- 2 Querschnitt der Sparschleusen Minden i.W. und Anderten
- 3 Zwillingschachtschleuse Eisenhüttenstadt/O.
- 4 " " " "
- 5 Schleuse Saint Pierre der Rhone-Staustufe Donzère-Mondragon
- 6 Längsschnitt der Schleuse Donzère-Mondragon
- 7 Füll- und Entleerungseinrichtungen der Schleuse Donzère-Mondragon
- 8 Querschnitt der Schleusenkammer von Donzère-Mondragon
- 9 Füllrichtungen der Schleusen des Tennessee
- 10 Bonneville-Schleuse am Columbia-River in Oregon
- 11 Lageplan der Stauhaltung am Columbia-River mit der Schleuse Mc Nary
- 12 Querschnitt durch die Kammer der Mc Nary-Schleuse
- 13 Füll- und Leereinrichtungen der Mc Nary-Schleuse
- 14 Torflügel der Mc Nary-Schleuse
- 15 Ansicht der neuen Wilson-Schleuse
- 16 Grundriß und verschiedene Schnitte durch die neue Wilson-Schleuse nach [24]
- 17 Blick auf die Stauanlage Ice Harbour mit der zur Zeit höchsten Schleuse der Welt
- 18 Unterhaupt mit dem Hubtor der Schleuse Ice Harbour
- 19 Grundriß und Schnitt der Ice Harbour-Schleuse mit Füll- und Entleerungssystem (nach [40])
- 20 Einzelheiten der Füll- und Entleerungseinrichtungen in der Kammer der Ice Harbour-Schleuse (nach [40])
- 21 Füllung der Schleusenkammer Ice Harbour
- 22 Zusammenstellung der wichtigsten Kenngrößen über die höchsten Schleusen in der Welt
- 23 Lageplan des Schleusenmodells
- 24 MeReinrichtungen des Schleusenmodells

- Abb. 25 Gesamtansicht des Schleusenmodells vom Unterhafen aus
- 26 Oberer Vorhafen mit vor der Schleuseneinfahrt liegendem Modellschiff und Registriervorrichtung für die Trossenkräfte
- 27 Oberhaupt der Modellschleuse mit Einlauföffnungen
- 28 Blick in die 60 cm breite und 2 m tiefe Schleusenkammer mit eingebauten Schwimmern
- 29 Unterhaupt der Schachtschleuse mit geöffnetem Hubtor
- 30 Trommel zur Registrierung der Füllkurven beim Schleusungsvorgang
- 31 Zentrales Schaltpult mit Gleichrichter
- 32 Schiefe Ebene zum Bedienen der Rollkeilschütze am Oberhaupt
- 33 Schiefe Ebene zum Bedienen des Hubtores sowie der Rollkeilschütze am Unterhaupt
- 34 Blick auf das in Kammermitte liegende Schiff vor dem Schleusungsvorgang. Füll- und Entleerungssystem: Längsumläufe mit Stichkanälen
- 35 Lage des Schiffes in halber Hubhöhe während des Schleusungsvorganges
- 36 Lage des Schiffes in der Kammer kurz vor Ausspiegelung mit dem Oberwasser
- 37 Blick auf die Registriervorrichtungen der Trossenkräfte (Längs- und Querkräfte) des in Kammermitte liegenden Schiffes nach der Füllung
- 38 Turbulente Wasserbewegung vor den Auslässen am Unterhaupt während des Entleerungsvorganges
- 39 Blick auf das Einlaufsystem der Schleuse mit angeschlossenem Grundlauf
- 40 Blick auf das Entleerungssystem der Schleuse mit angeschlossenem Grundlauf
- 41 Maximale sekundliche Zunahme des Zuflusses während der 1. Füllphase bei verschiedenen Zuflußbeiwerten μ
- 42 Maximale sekundliche Zunahme des Zuflusses während der 1. Füllphase bei verschiedenen Hubhöhen
- 43 Zum maximalen Zufluß Q_{\max} gehörige Füllzeiten t_{\max} bei verschiedenen Zuflußbeiwerten μ

- Abb. 44 Zum maximalen Zufluß Q_{\max} gehörige Füllzeiten t_{\max} bei verschiedenen Hubhöhen
- 45 Maximaler Zufluß während der Füllung bei verschiedenen Zuflußbeiwerten μ
- 46 Maximaler Zufluß während der Füllung bei verschiedenen Hubhöhen
- 47 Füll- bzw. Leerzeiten T bei verschiedenen Zuflußbeiwerten μ
- 48 Füll- und Leerzeiten T bei verschiedenen Hubhöhen
- 49 Analytische Füllungsberechnung für eine Schleuse 165 m x 12 m mit $H_{\text{ges}} = 30,0$ m bei einer Hubgeschwindigkeit der Rollkeilschütze $V_s = 6$ mm/s
- 50 Füllungsberechnung für eine Schleuse 165 m x 12 m mit $H_{\text{ges}} = 30,0$ m bei einer Hubgeschwindigkeit der Rollkeilschütze $V_s = 6$ mm/s (zeichn. Auftragung)
- 51 Analytische Füllungsberechnung für eine Schleuse 165 m x 12 m mit $H_{\text{ges}} = 30,0$ m bei einer Hubgeschwindigkeit der Rollkeilschütze $V_s = 12$ mm/s
- 52 Füllungsberechnung für eine Schleuse 165 m x 12 m mit $H_{\text{ges}} = 30,0$ m bei einer Hubgeschwindigkeit der Rollkeilschütze $V_s = 12$ mm/s (zeichn. Auftragung)
- 53 Füll- und Zuflußkurve aus Modellversuchen für $V_s = 12$ mm/s bei Füll- und Entleerungssystem Variante I
- 54 Maximale Steigegeschwindigkeit des Kammerwasserspiegels aus analytischem Verfahren und Modellversuchen
- 55 Maximaler Zufluß Q_{\max} aus analytischen Verfahren und Modellversuchen
- 56 Zu Q_{\max} gehörige Füllzeiten t_{\max} aus analytischen Verfahren und Modellversuchen
- 57 Maximale sekundliche Zunahme des Zuflusses $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\max}$ bzw. $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{\max}$ aus analytischen Verfahren und Modellversuchen
- 58 Füllzeiten T aus analytischen Verfahren und Modellversuchen
- 59 Verhältnis $\frac{Q_{\max}}{Q_m}$ bzw. $\frac{s_{\max}}{s_m}$ aus analytischen Verfahren und Modellversuchen
- 60 Verlauf der Trossenkräfte während des Schleusungsvorganges eines in Kammermitte liegenden Schiffes. Füll- und

Entleerungssystem Variante I; $V_s = 6 \text{ mm/s}$

- Abb. 61 Verlauf der Trossenkkräfte während des Schleusungsvorganges eines in Kammermitte liegenden Schiffes. Füll- und Entleerungssystem Variante I; $V_s = 12 \text{ mm/s}$
- 62 Verlauf der Trossenkkräfte während des Schleusungsvorganges eines in Kammermitte liegenden Schiffes. Füll- und Entleerungssystem Variante II; $V_s = 6 \text{ mm/s}$
- 63 Verlauf der Trossenkkräfte während des Schleusungsvorganges eines in Kammermitte liegenden Schiffes. Füll- und Entleerungssystem Variante II; $V_s = 12 \text{ mm/s}$
- 64 Verlauf der Trossenkkräfte während des Schleusungsvorganges eines in Kammermitte liegenden Schiffes. Füll- und Entleerungssystem Variante III; $V_s = 6 \text{ mm/s}$
- 65 Verlauf der Trossenkkräfte während des Schleusungsvorganges eines in Kammermitte liegenden Schiffes. Füll- und Entleerungssystem Variante III; $V_s = 12 \text{ mm/s}$
- 66 Ergebnisse der Trossenkraftmessungen eines in Kammermitte liegenden Schiffes (Schleusenmodell Variante I)
- 67 Ergebnisse der Trossenkraftmessungen eines in Kammermitte liegenden Schiffes (Schleusenmodell Variante II)
- 68 Ergebnisse der Trossenkraftmessungen eines in Kammermitte liegenden Schiffes (Schleusenmodell Variante III)
- 69 Maximale resultierende Trossenkkräfte (Längs- und Querkkräfte eines in Kammermitte liegenden Schiffes bei verschiedenen Füll- und Entleerungssystemen (aus Messungen am Schleusenmodell))
- 70 Maximale Sunkttiefen im Oberhafen beim Füllen der Kammer nach analytischen Verfahren und Modellversuchen. Füll- und Entleerungssystem: Variante I
- 71 Maximale Sunkttiefen im Oberhafen beim Füllen der Kammer und maximale Schwallhöhen im Unterhafen beim Leeren der Kammer aus Modellversuchen. Füll- und Entleerungssystem: Variante I
- 72 Maximale Trossenkkräfte eines in den Vorhafen wartenden Schiffes (ungünstigster Liegeplatz) aus Messungen am Schleusenmodell. Füll- und Entleerungssystem: Variante I
- 73 Maximale Trossenkkräfte eines im Vorhafen am ungünstigsten Liegeplatz wartenden Schiffes aus Berechnungen mittels der Wellenneigung und aus Modellversuchen. Füll- und Entleerungssystem: Variante I
- 74 Maximale Trossenkraft eines im Vorhafen wartenden Schiffes in Abhängigkeit von der Wellenneigung und der Trossenlänge nach PARTENSCHKY [29]

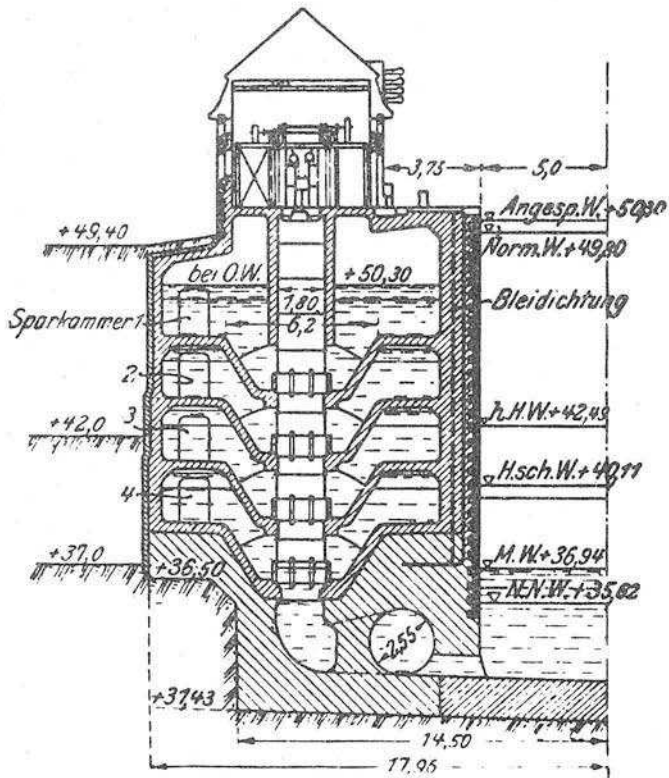


Abb. 1 Speicher-schachtschleuse
Minden i.W.

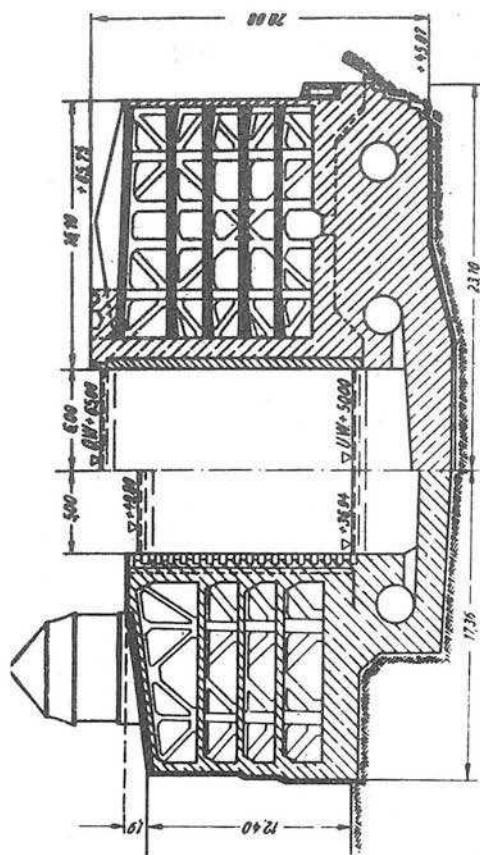


Abb. 2 Querschnitt der Sparschleusen Minden
i.W. und Anderten

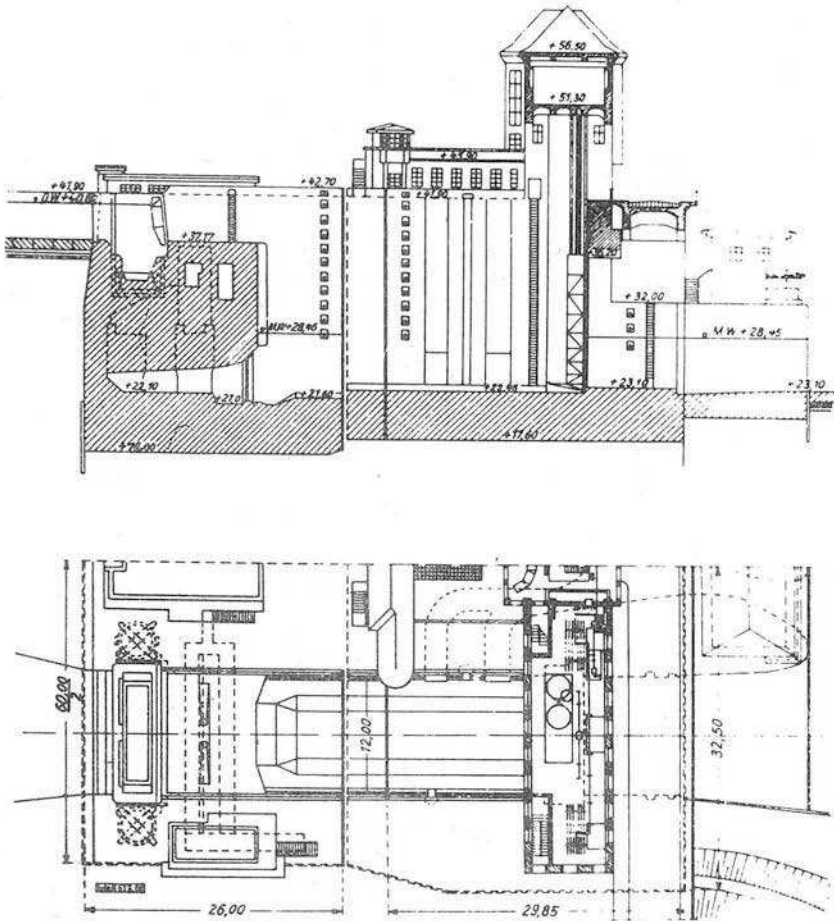


Abb. 3 Zwillingsgeschachtschleuse Eisenhüttenstadt/O.
(Längsschnitt durch das Ober- u. Unterhaupt)

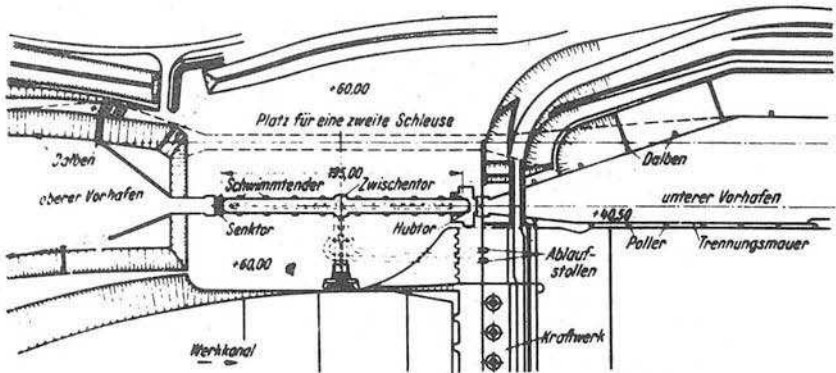


Abb. 5 Schleuse Saint Pierre der Rhône-Staustufe Donzère-Mondragon (Lageplan)

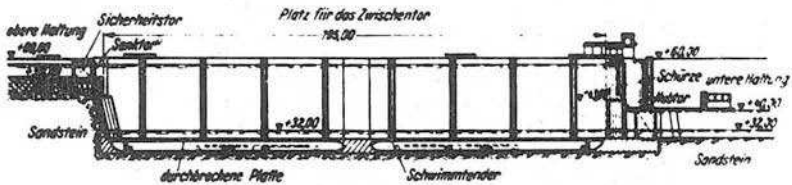


Abb. 6 Längsschnitt der Schleuse Donzère-Mondragon

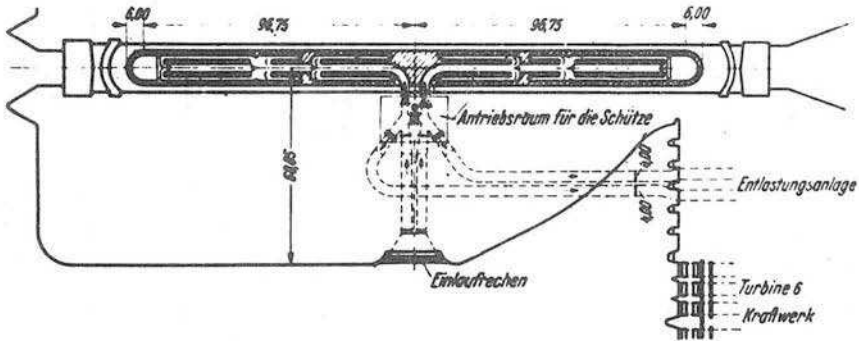


Abb. 7 Füll- und Entleerungseinrichtungen der Schleuse Donzère-Mondragon

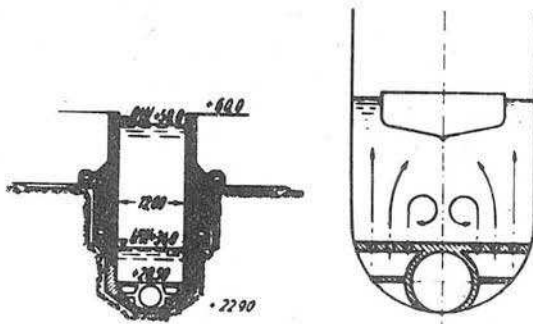


Abb. 8 Querschnitt der Schleusenammer von Donzère-Mondragon (rechts: Selbsttätige Zentrierung des Schiffes in der Kammer)

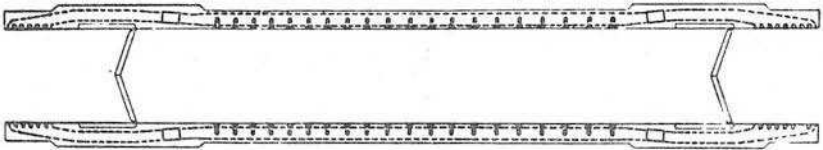


Abb. 9 Fülleinrichtungen der Schleusen des Tennessee ("Conventional Type")

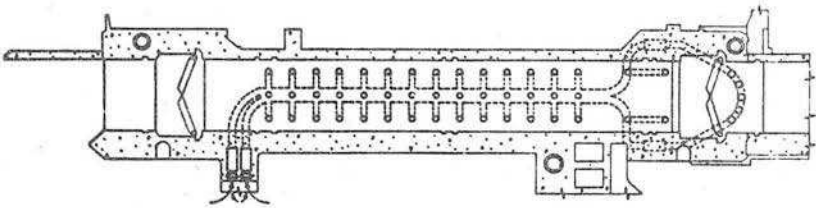


Abb. 10 Bonneville-Schleuse am Columbia-River in Oregon

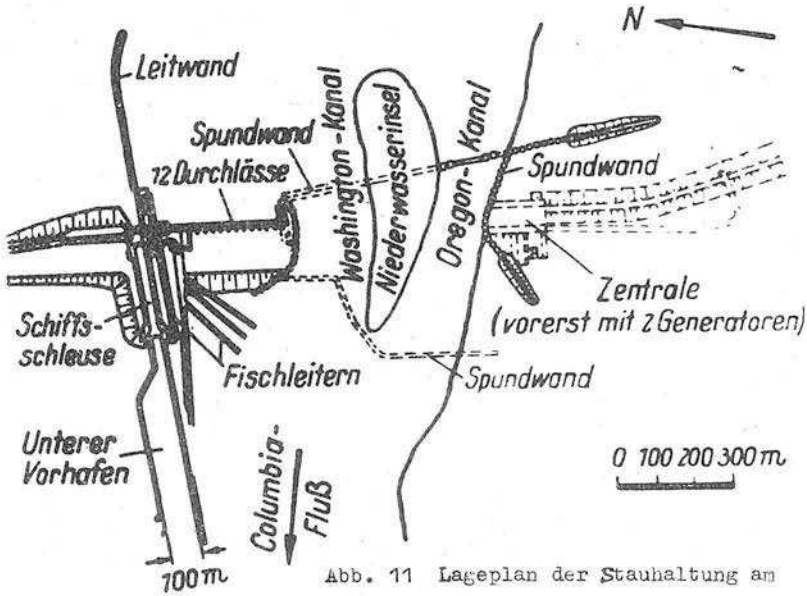


Abb. 11 Lageplan der Stauhaltung am Columbia-River mit der Schleuse Mc Nary

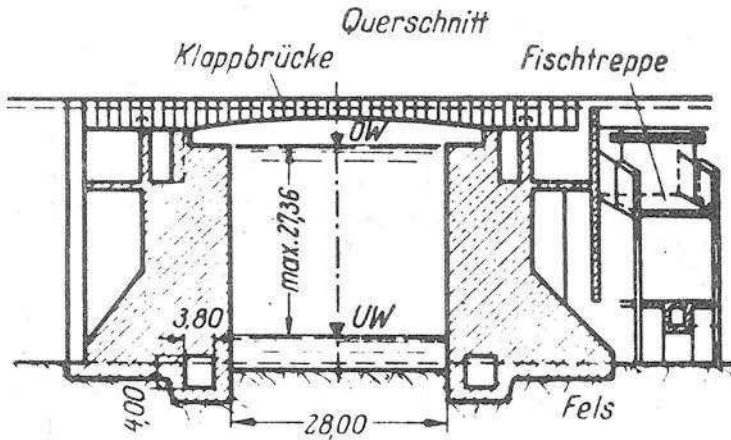


Abb. 12 Querschnitt durch die Kammer der Mc Nary-Schleuse

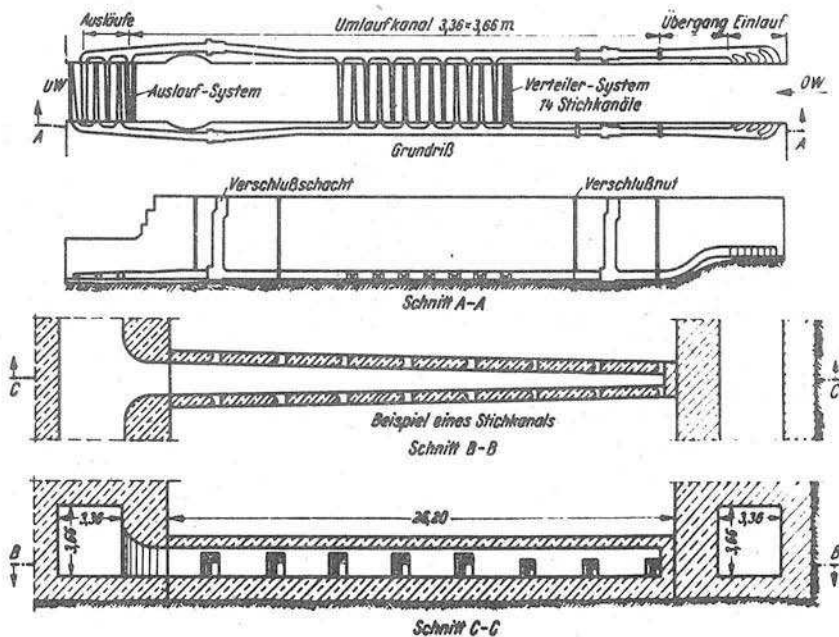


Abb. 13 Füll- und Leereinrichtungen der Mc Nary-Schleuse

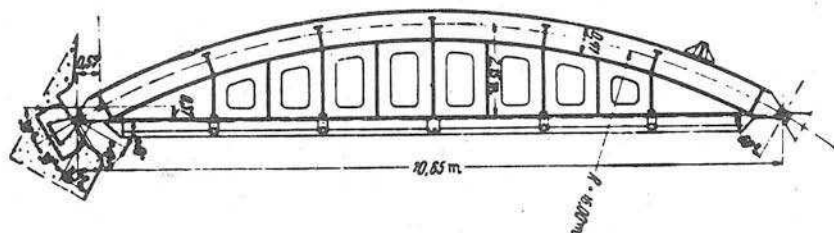


Abb. 14 Torflügel der Mc Nary-Schleuse

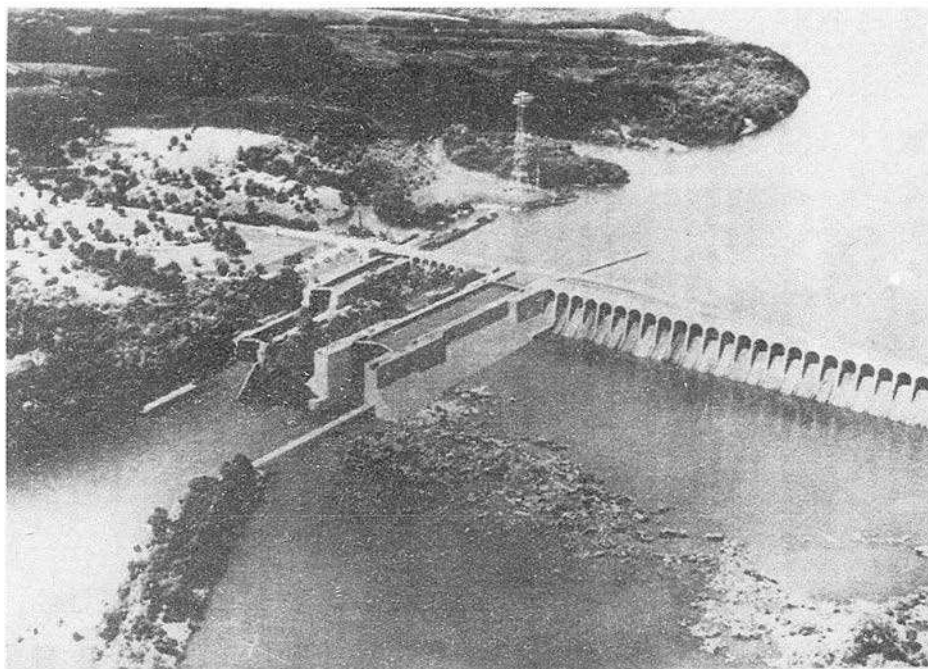


Abb. 15 Ansicht der neuen Wilson-Schleuse
rechts neue Schleuse, links alte Schleusentreppe

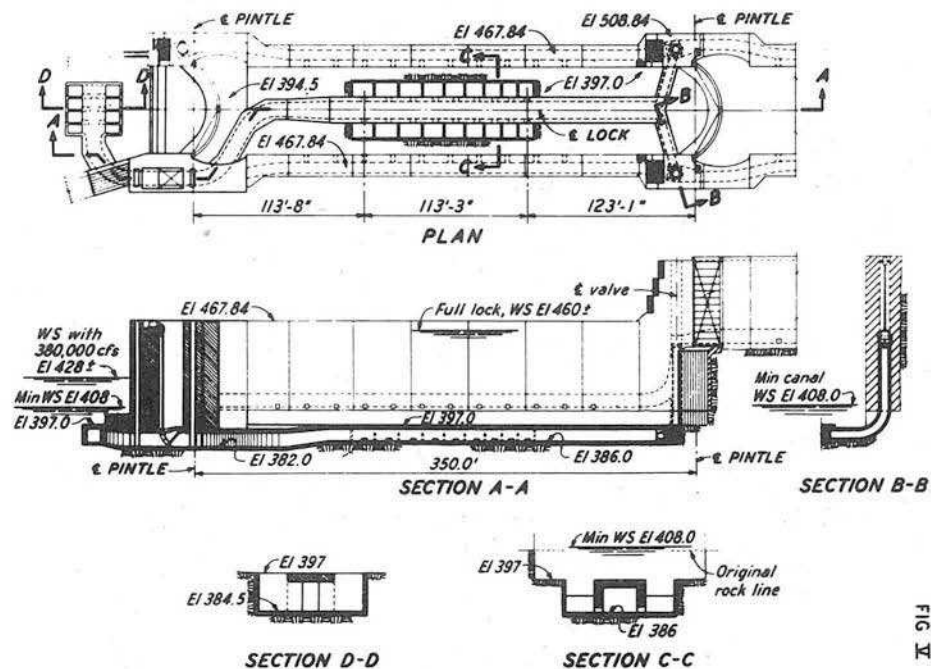


FIG. 1

Abb. 16 Grundriß und verschiedene Schnitte durch die neue Wilson-Schleuse nach [24]

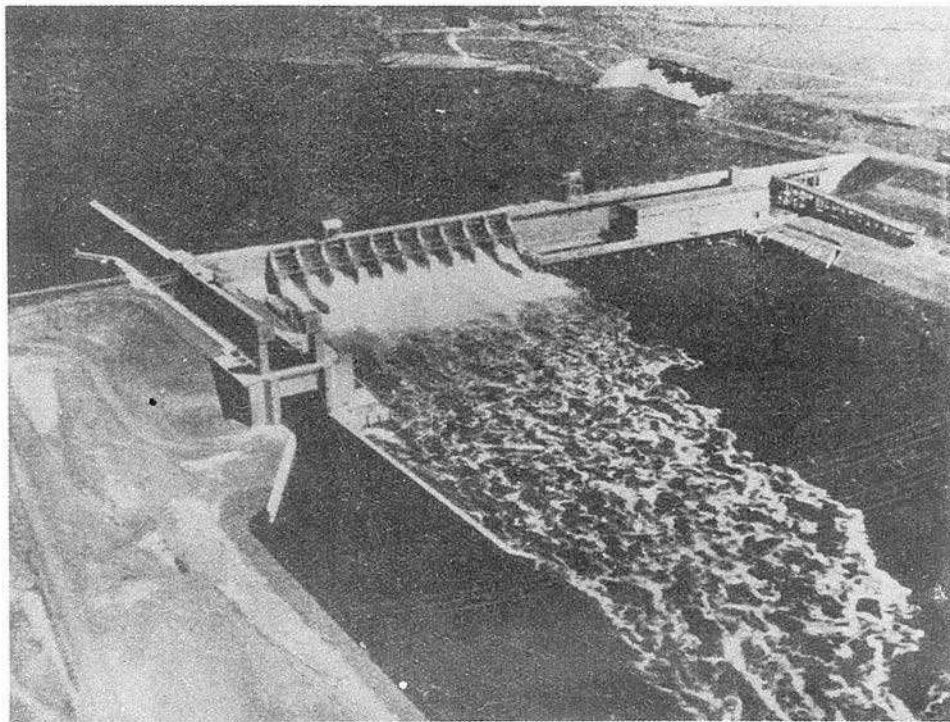


Abb. 17 Blick auf die Stauanlage Ice Harbour mit der zur
Zeit höchsten Schleuse der Welt

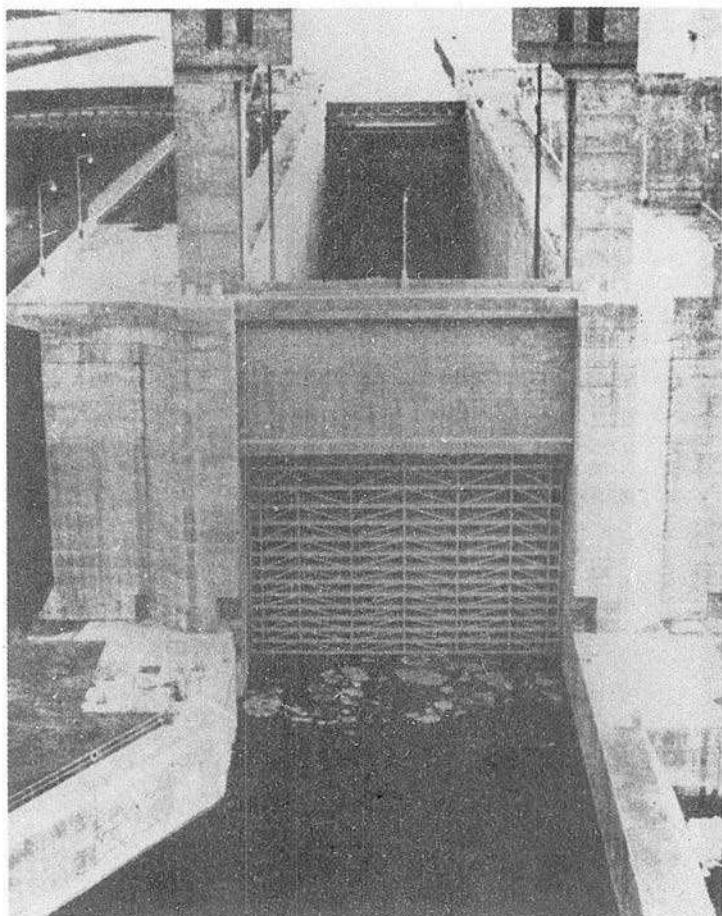
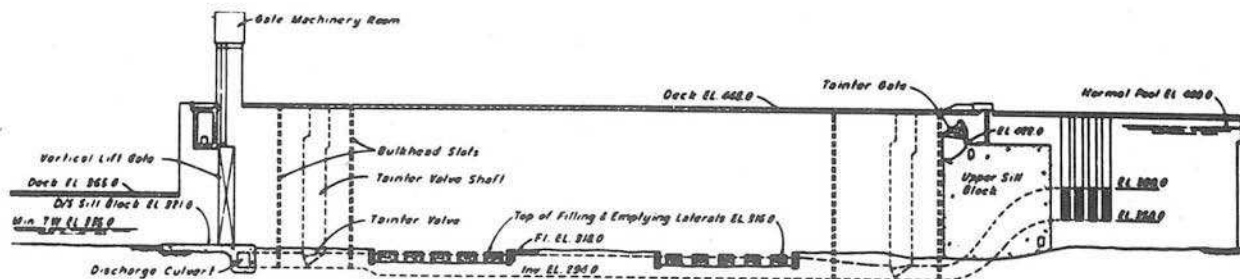


Abb. 18 Unterhaupt mit dem Hubtor der Schleuse
Ice Harbour (Im Hintergrund ist das Obertor
ersichtlich)



SECTION AT LOCK 1

SCALE IN FEET
0 20 40

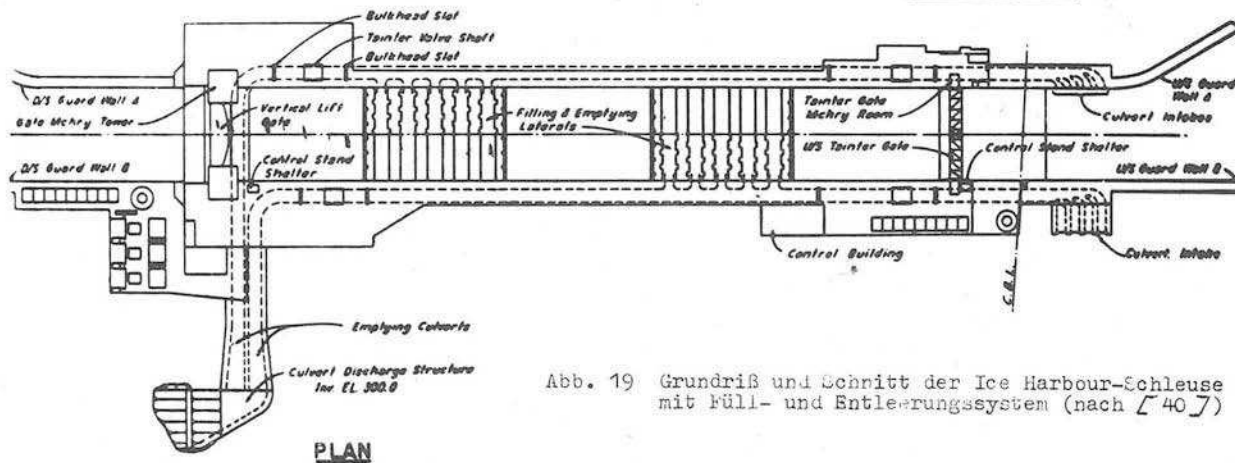


Abb. 19 Grundriß und Schnitt der Ice Harbour-Schleuse mit Füll- und Entleerungssystem (nach [407])

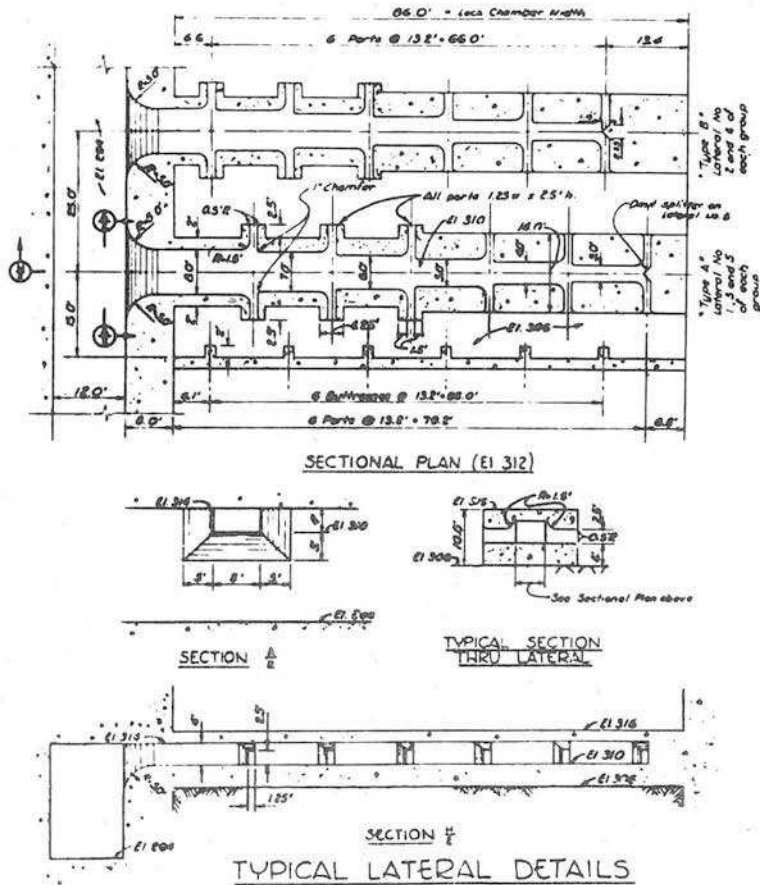


Abb. 20 Einzelheiten der Füll- und Entleerungs-
einrichtungen in der Kammer der Ice Harbour-
Schleuse (nach [40])

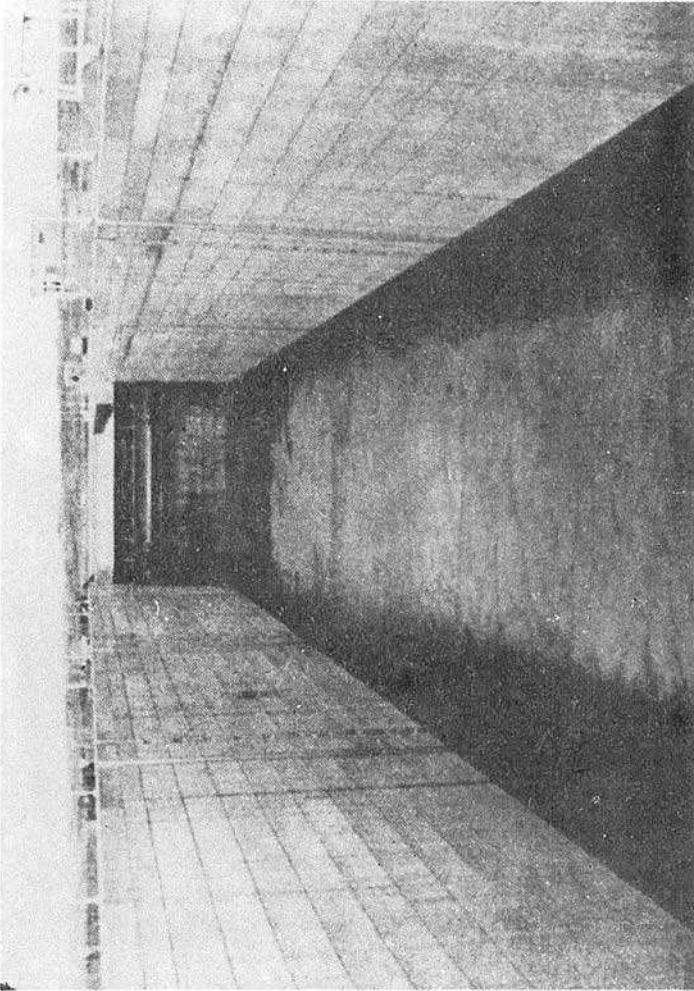


Abb. 21 Füllung der Schleusenammer Ice Harbour

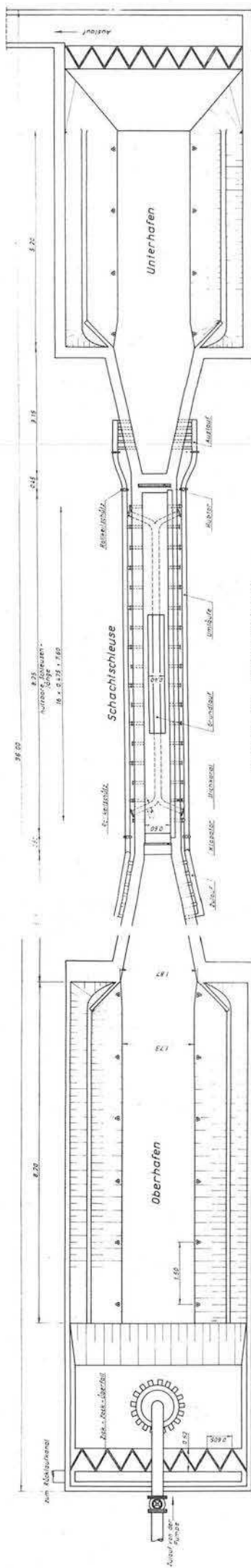
Zusammenstellung der wichtigsten Kenngrößen über die höchsten Schleusen in der Welt

Abb. 22

Name	Gewässer	Innenmaße Nutzlänge Breite	Hubhöhen H max H mittel H min	Füllwasser- Menge 1)	Füll- zeiten min. sek.	Zufluß		Steige- geschwindigkeit		Füllsystem	Füllschützen	Hubzeit min., sek.	Verschluß- fläche m²	Gesamt- fläche der Füll- öffnung m²	Verschlußorgane				Jahr der Fertig- stellung		
						mittel m³/sek	maximal m³/sek	mittel m/min	maximal m/min						Oberhaupt		Unterhaupt				
		m	m	m³											Typ	Höhe m	Typ	Höhe m			
Fessenheim (Frankr.)	Rhein - seitenkanal	185 23 (12)	17,0 16,25	72 300 69 100	~ 14	86	115	~ 1,20	1,50	Längskanäle in den Seitenwänden, Mittelkanal, Füllung von der Sohle	Rollkeilsch. mit Leder- dichtung		23,1		Stemm- tor		Hubtor		1956		
Ottmarsheim (Frankr.)	Rhein - seitenkanal	185 23 (12)	18,0 16,40	76 600 69 800	~ 15	85	150	~ 1,20	1,50	System wie bei Fessenheim	Rollkeilsch. mit Leder- dichtung		23,1		Stemm- tor	8,5	Hubtor	~ 15,0	1952		
Bollène Donzère-Mondragon (Frankr.)	Rhône	200 12	26,00 24,00	62 400 57 400	7 - 04	136	~ 239	3,10	~ 6,00	1 Grundkanal Verteilerkanäle in Längsrichtung, Füllung von der Sohle	Rollkeilsch.	4 - 00	19,2		Senktor gewölbt nur auf Druck be- ansprucht		Hubtor halbzylind.		1954		
Aschach (Österr.)	Donau	230 24	17,35 16,18 12,92	(107 700) 95 800 89 300 71 300	12 - 08 11 - 52 11 - 20	(148) 132	228	1,43 1,36 1,14	2,20	2 Grundkanäle Füllschlitze in der Sohle quer zur Längsachse	Rollschützen mit zusätzl. Füllöffnungen	11 - 25 35% IN 4 - 45	32,00	87,40	Stemm- tor		Stemm- tor	22,0	1962 und 1963		
Stěchovice (CSSR)	Moldau	118,4 12,0	20 - 22	28 400 - 31 200						Längsumläufe in den Seitenwänden, Stichkanäle	Rollkeilsch.	v = 38m/min	8,0		Stemm- tor	8,0	Stemm- tor	25,0	1945		
Kuibyschew (SU)	Volga	290,0 30,0	~ 15,0	130 300						1 Grundkanal, Füllschlitze in der Sohle	Rollkeilsch.				Stemm- tor		Stemm- tor		1958		
Bonnerville (USA)	Columbia	152,40 23,16	20,27 17,68 9,14	71 500 62 400 32 300	(11 - 30) 15 - 00	70		1,18		1 Grundkanal in Schleusenachse, Stich- kanäle, kreisförmige Füllöffn.	Segment- sch. mit Druck- lager	(2 - 18)	14,95	47,64	Stemm- tor	13,7	Stemm- tor	31,2	1938		
Mc. Nary (USA)	Columbia	205,74 26,21	28,04 2) 24,39 19,20	151 200 134 800 103 500	16 - 06 15 - 24 14 - 06	157 146 122		1,74 1,62 1,36		Seitenkanäle, Stich- kanäle quer zur Längsachse, Füllung von der Sohle	Segment- sch. erstmalig m. Zuglager	(4 - 00) 7 - 30	24,52	45,17	Stemm- tor	6,7	Stemm- tor	32,3	1953		
Grass River (USA)	St. Lawrence Seaway	262,13 24,38	18,94	98 500	8 - 30	187	378	1,76	3,54	Seitenkanäle, Stichkanäle in den Seitenwänden	System wie bei Mc. Nary	4 - 00	31,22	65,69							
The Dalles (USA)	Columbia	205,74 26,21	27,58 26,67 24,99	148 700 143 800 134 800	10 - 42	210		2,34		System wie bei Mc. Nary	System wie bei Mc. Nary	4 - 12	31,22	61,67	Segment- tor	6,7	Stemm- tor	32,8	1957		
Wilson neue Schleuse (USA)	Tennessee	183,0 33,5	30,5	187 000	12		570	2,52		1 Grundkanal, Füllöffnungen in der Mitte beiderseitig zur Achse	Flach- schütze				Stemm- tor		Stemm- tor	26,3	1960		
Jce Harbour (USA)	Snake	205,74 26,21	(32,00) 31,39 30,42	169 300 164 400	11 - 18	239		2,66		System wie bei Mc. Nary, Stichkanäle in 2 Gruppen aufgeteilt	System wie bei Mc. Nary	4 - 00	31,22	34,65	Segment- tor	6,1	Hub- tor	27,7	1962		
John Day (USA) 3)	Columbia	205,74 26,21	34,4	185 000											Senk- tor	8,1	Hub- tor	34,4	(1968)		
Lower Monumental (USA)	Snake (Columbia)	205,74 26,21	31,4	169 000						System wie bei Jce Harbour					Senk- tor	6,4	Hub- tor	25,6	(1967)		
Little Goose (USA) 3)	Snake (Columbia)	205,74 26,21	30,8	166 000						System wie bei Jce Harbour					Segment- tor	6,7	Stemm- tor	36,2	(1969)		
Lower Granite (USA) 4)	Snake (Columbia)	205,74 26,21	32,0	172 000						System wie bei Jce Harbour					Segment- tor	7,0	Stemm- tor	37,5			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Anmerkungen:

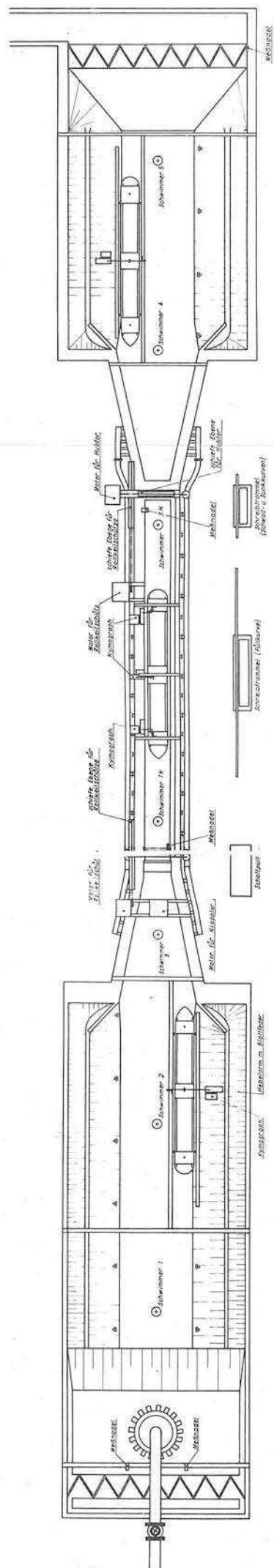
- 1) Aus Vergleichsgründen bezogen auf die Nutzlänge, die tatsächlichen Werte liegen etwas höher.
 2) Die Fertigstellung von John Day wird den maxim. Hub auf rd. 24 m reduzieren.
 3) Projekt z.Z. im Bau.
 4) Mit dem Bau wurde noch nicht begonnen.



Lageplan des Schleusenmodells

Material der Modelle 1 20

Abb. 23



Meßeinrichtungen des Schleusenmodells

Modell des Modells 1.20

Abb. 24

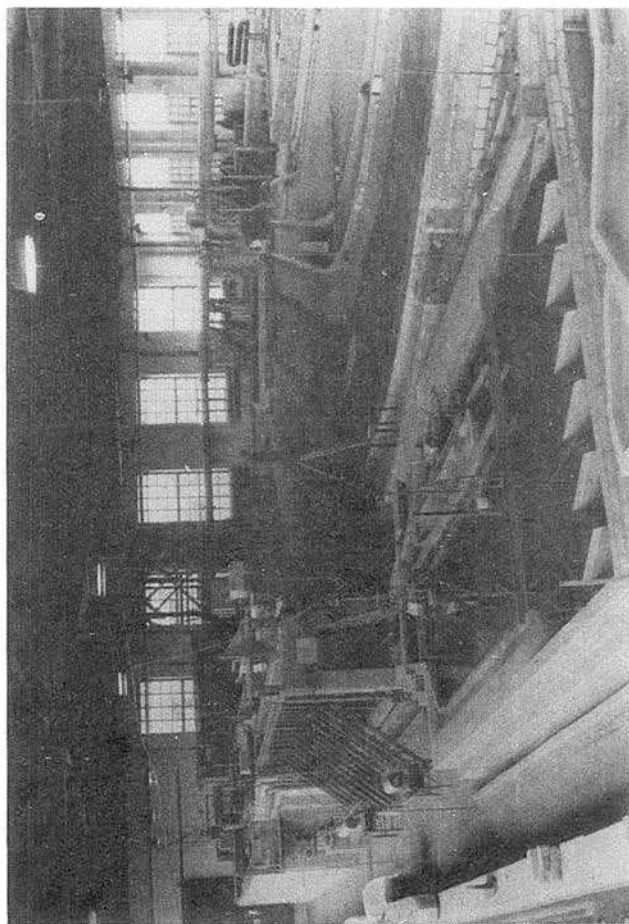


Abb. 25 Gesamtansicht des Schleusenmodells
vom Unterhafen aus

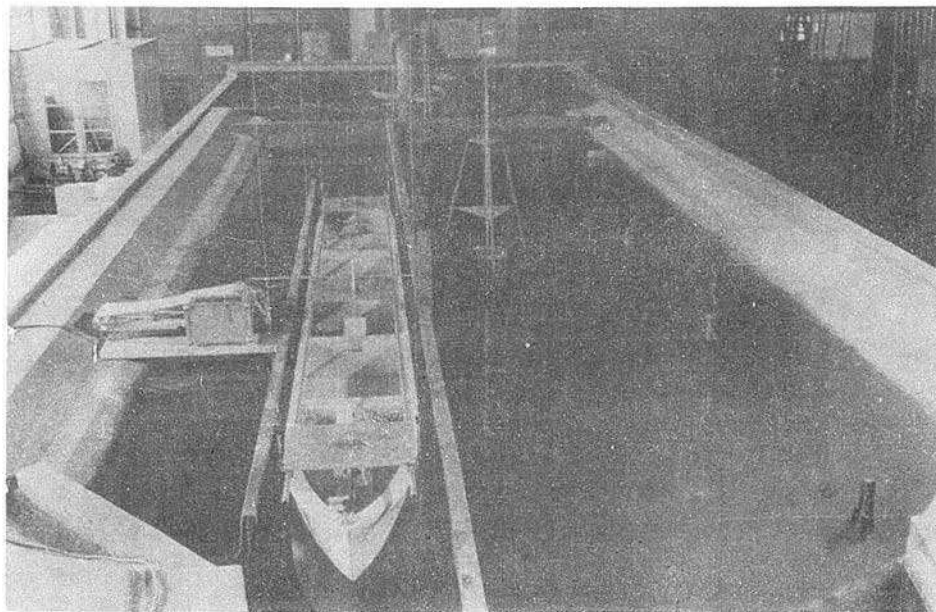


Abb. 26 Oberer Vorhafen mit vor der Schleuseneinfahrt liegendem Modellschiff und Registriervorrichtung für die Trossenkräfte

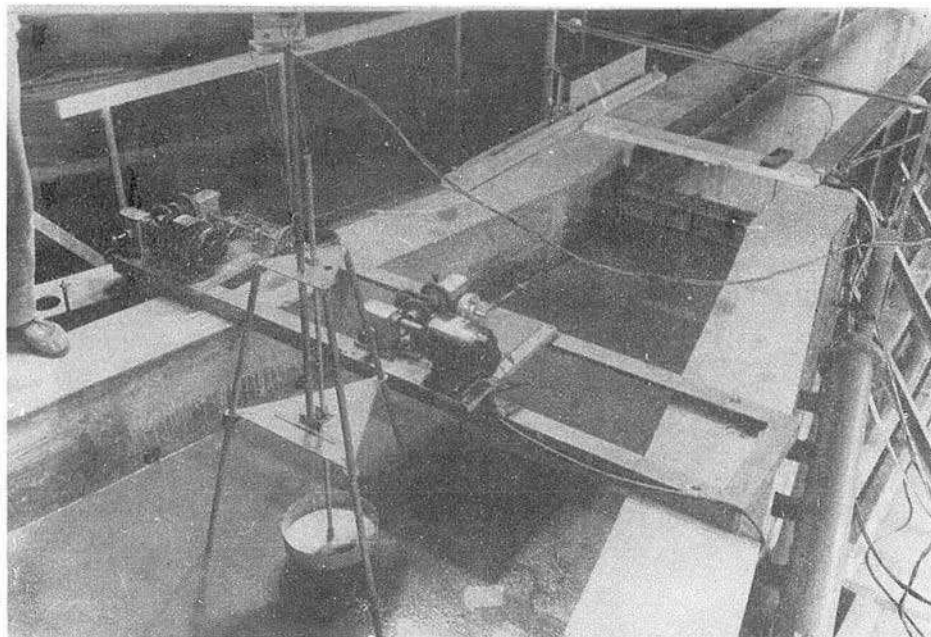


Abb. 27 Oberhaupt der Modellschleuse mit Einlauf-
öffnungen (Die zwei Motore dienen zum An-
trieb des Klapptores und der schiefen Ebe-
ne für die beiden oberen Rollkeilschütze)

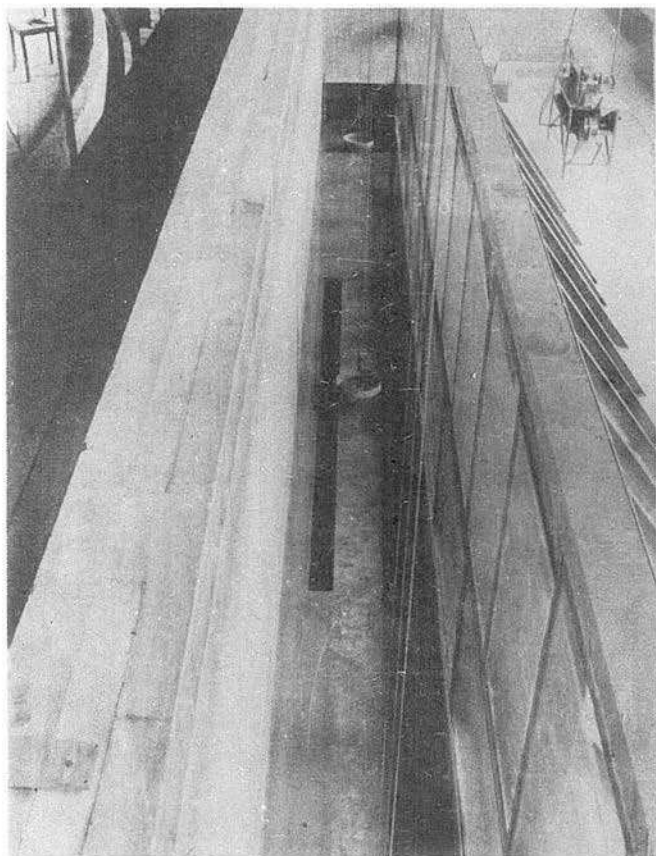


Abb. 28 Blick in die 60 cm breite
und 2 m tiefe Schleusenkam-
mer mit eingebauten Schwimmern

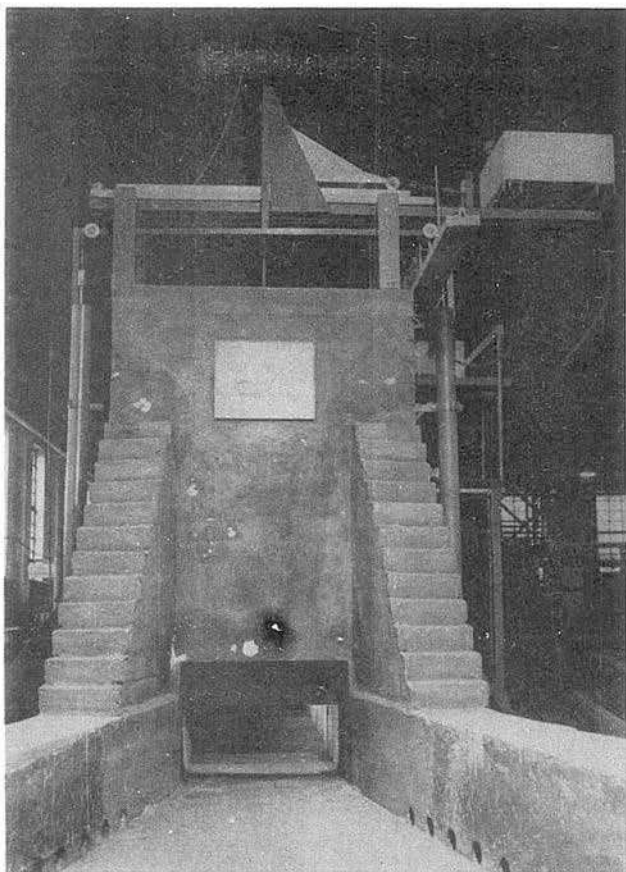


Abb. 29 Unterhaupt der Schachtschleuse mit geöffnetem Hubtor (Im Vordergrund sind die Auslaßöffnungen zu erkennen)

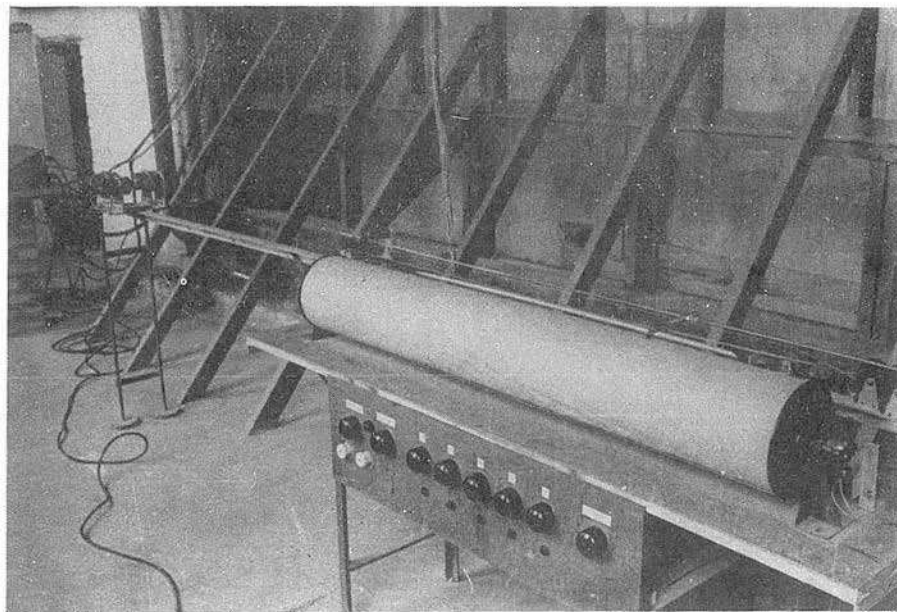


Abb. 30 Trommel zur Registrierung der Füllkurven
beim Schleusungsvorgang

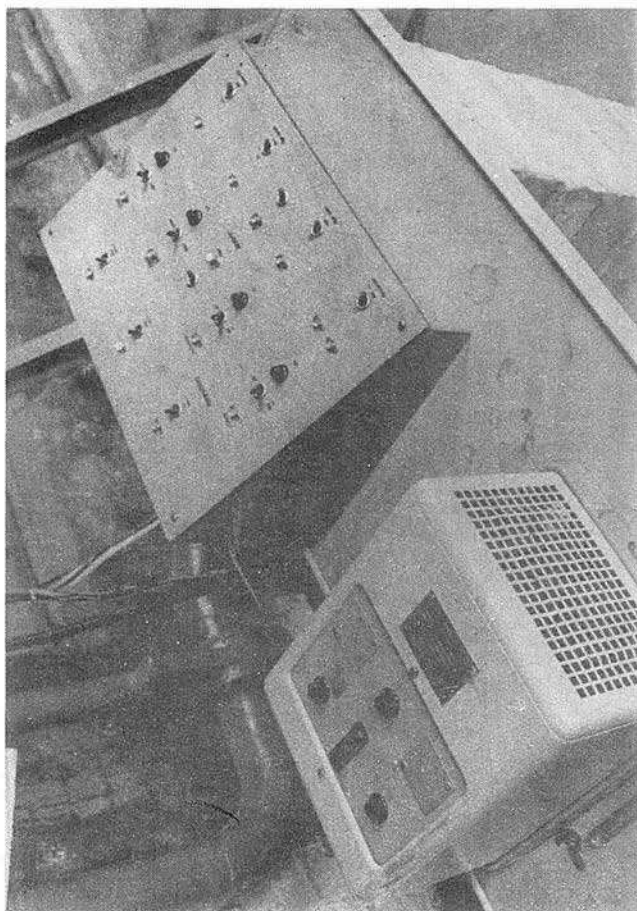


Abb. 31 Zentrales Schaltpult mit Gleichrichter

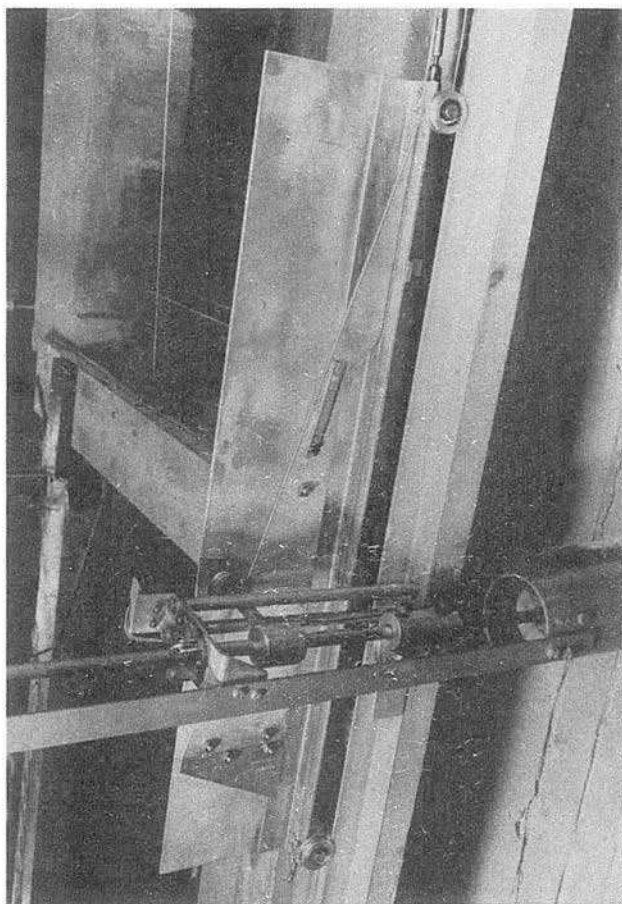


Abb. 32 Schiefe Ebene zum Bedienen der Roll-
keilschütze am Oberhaupt

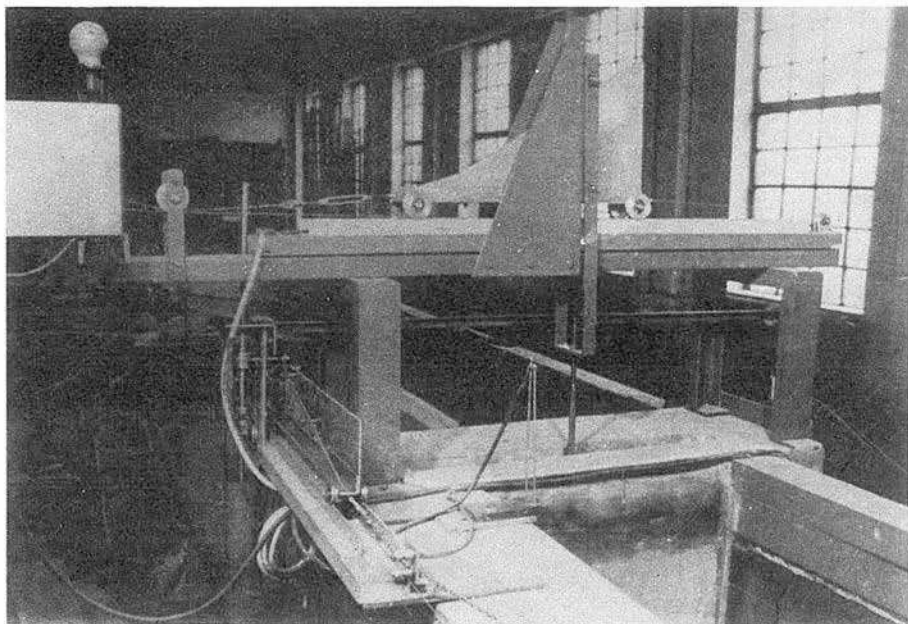


Abb. 33 Schiefe Ebene zum Bedienen des Hubtores
sowie der Rollkeilschütze am Unterhaupt

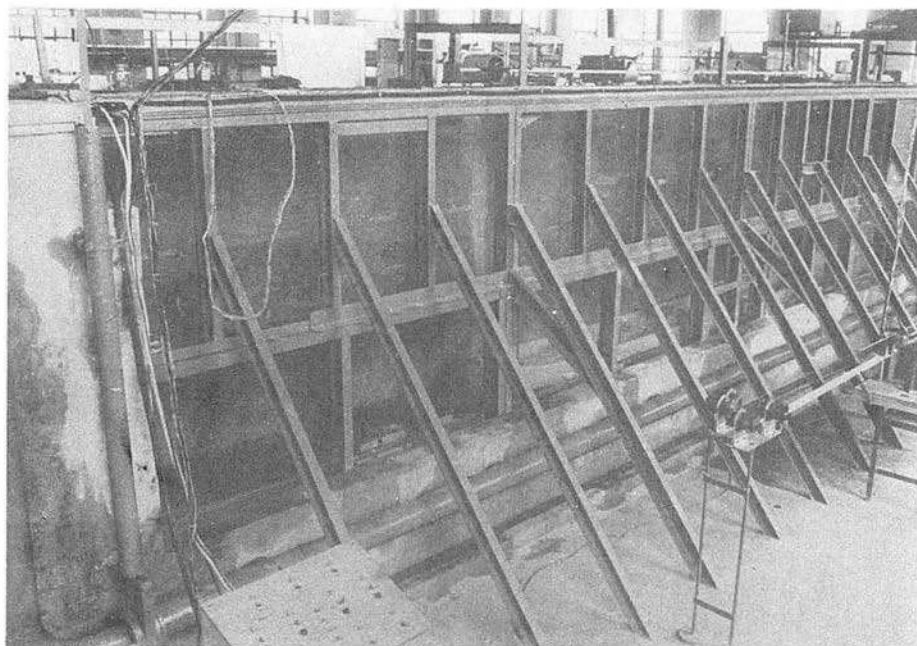


Abb. 34 Blick auf das in Kammermitte liegende
Schiff vor dem Schleusungsvorgang
Füll- und Entleerungssystem: Längsum-
läufe mit Stichkanälen (Variante I
bzw. II)

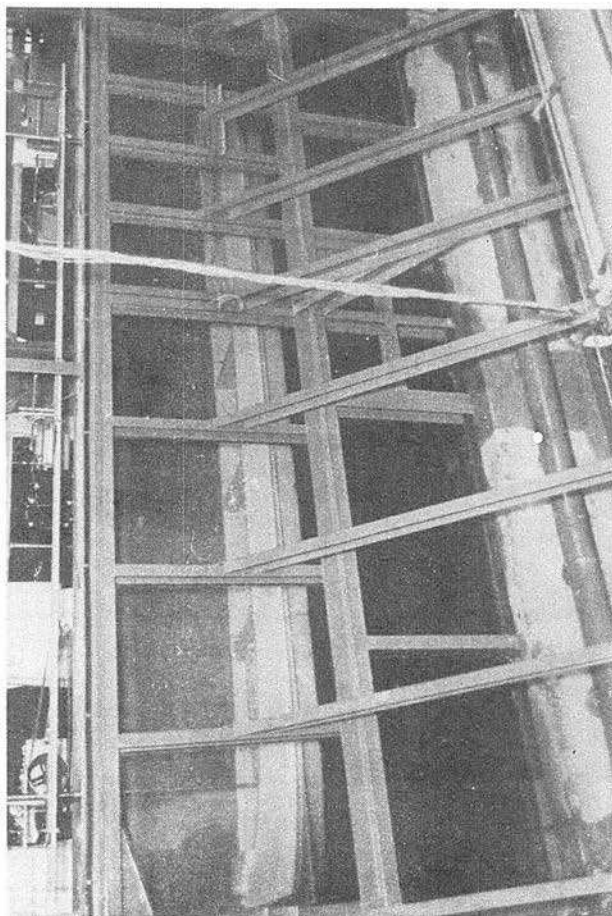


Abb. 55 Lage des Schiffes in halber Hubhöhe während des Schleusungsvorganges

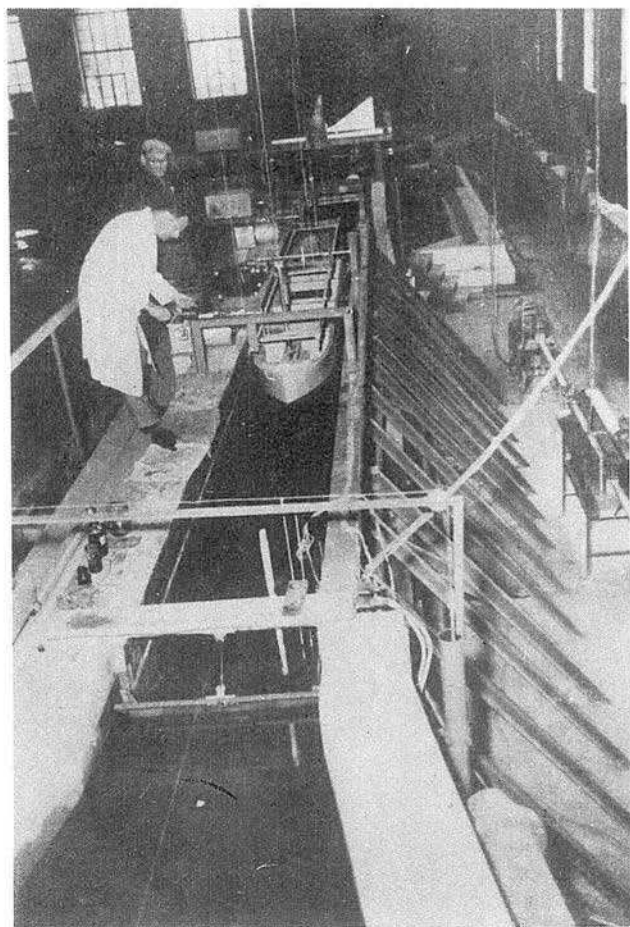


Abb. 90 Lage des Helikopter in der
Kammer kurz vor Ausspiege-
lung mit dem Überwasser
(Helikopter ist gerade ange-
sprungen)

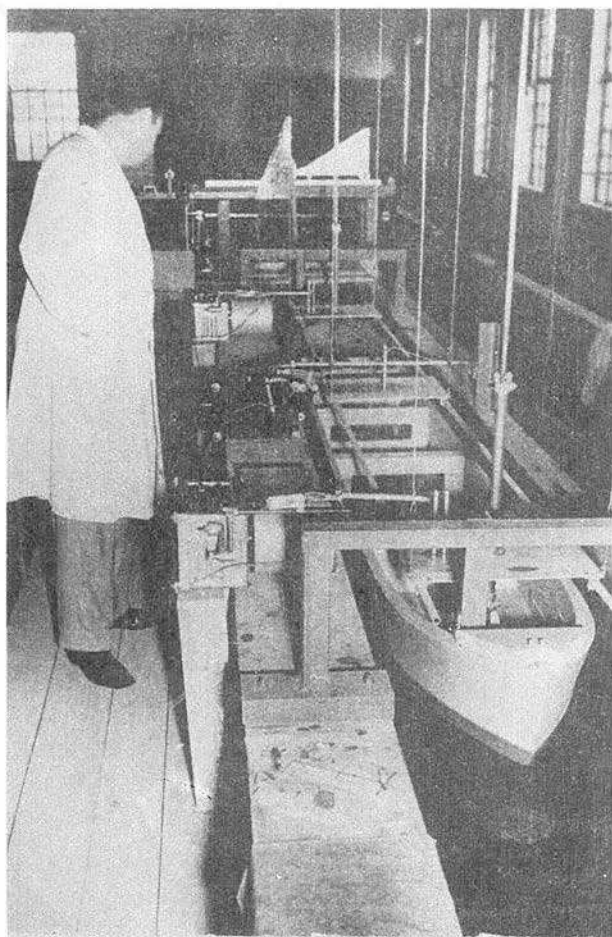


Abb. 57 Blick auf die Registriervorrichtungen der Trossenkräfte (Längs- und Querkräfte) des in Kammermitte liegenden Schiffes nach der Füllung

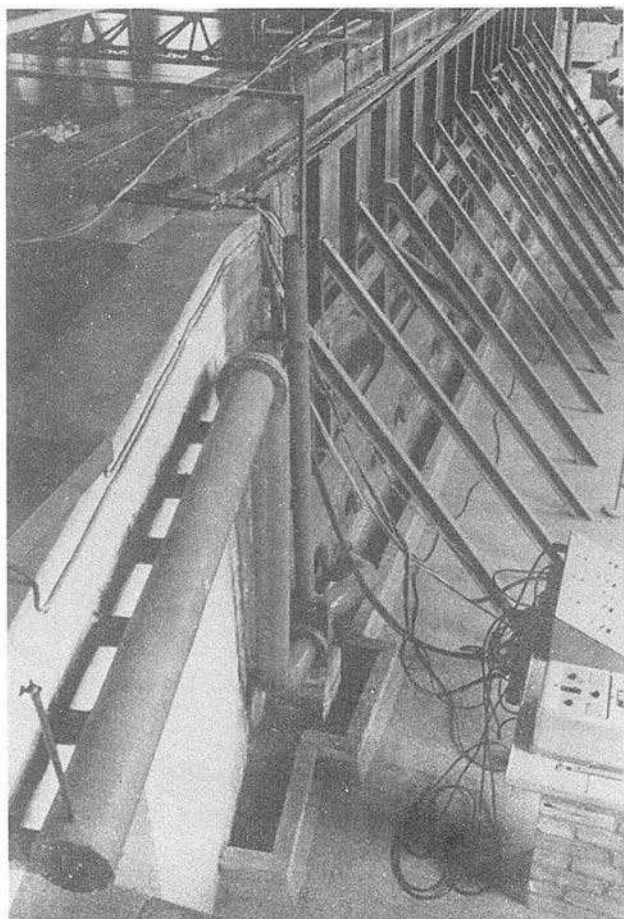


Abb. 39 Blick auf das Einlaufsystem
der Schleuse mit angeschlos-
senem Grundlauf (Variante III)



Abb. 38

Turbulente Wasserbewegung vor den Auslässen am Unterhaupt während
des Entleerungsvorganges

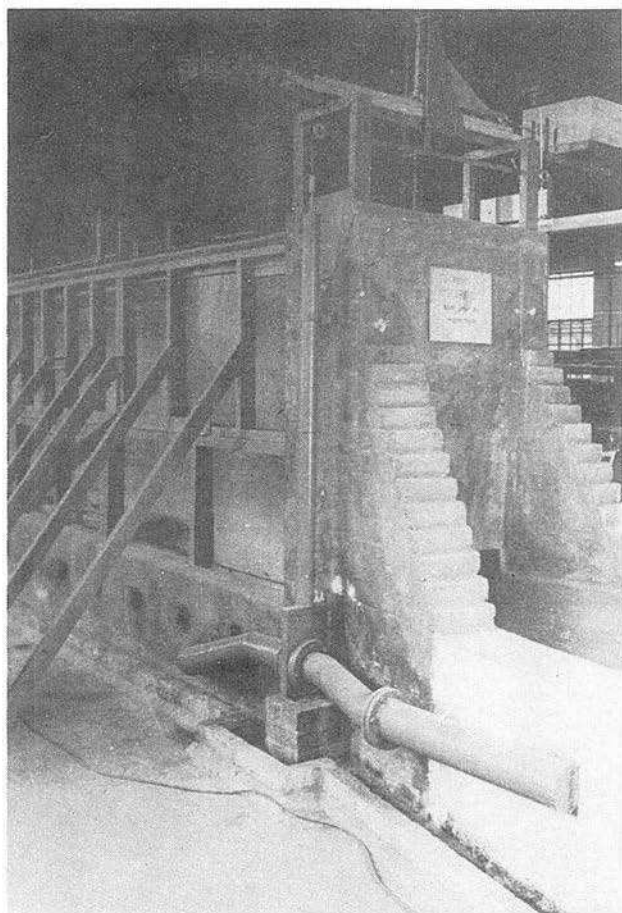


Abb. 40 Blick auf das Entleerungssystem
der Schleuse mit angeschlossenem
Grundlauf (Variante III)

Maximale sekundl. Zunahme des Zuflusses während der
1. Füllphase bei verschiedenen Zuflußbeiwerten μ

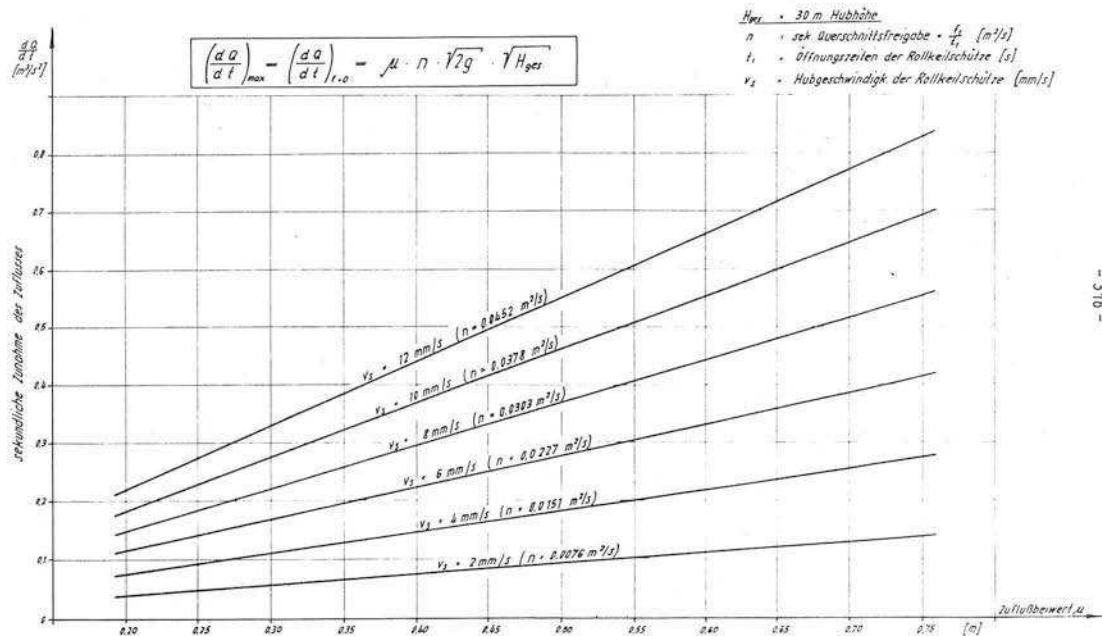


Abb. 41

Maximale sekundl. Zunahme des Zuflusses während der
1. Füllphase bei verschiedenen Hubhöhen

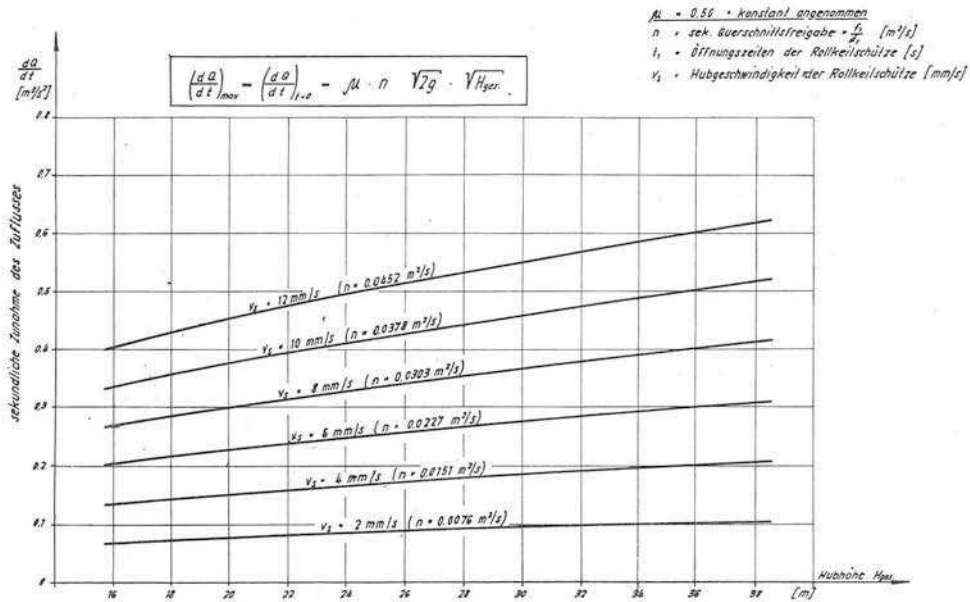


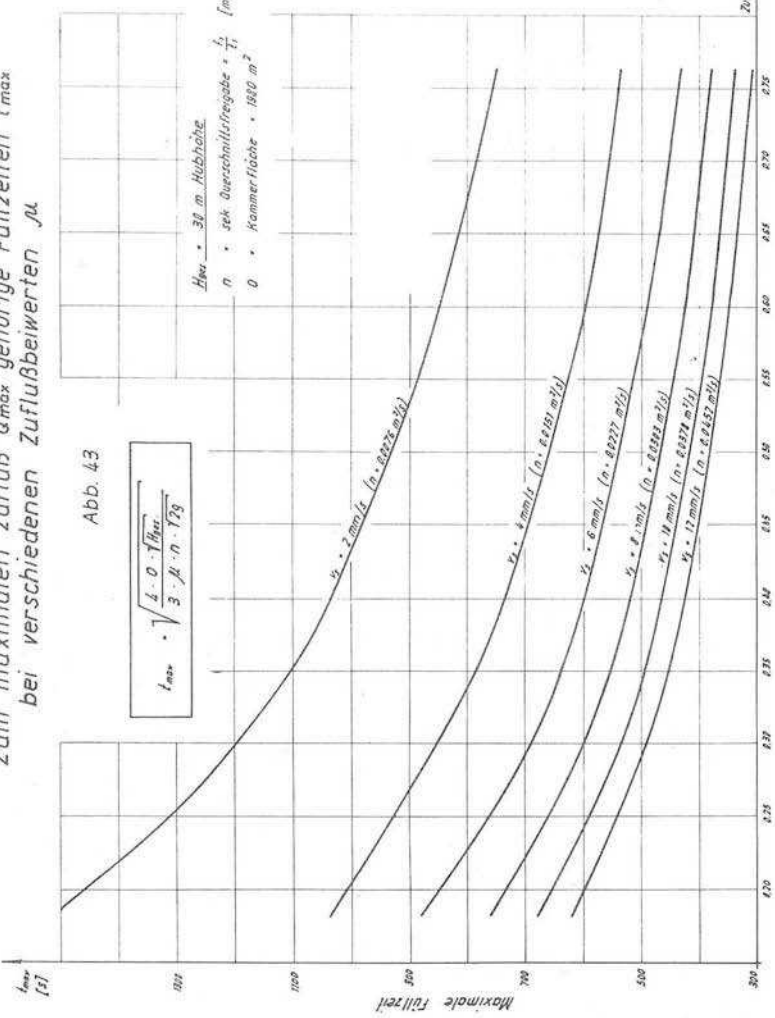
Abb. 42

Zum maximalen Zufluß Q_{max} gehörige Füllzeiten t_{max}
bei verschiedenen Zuflußbeiwerten μ

Abb. 43

$$t_{max} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0 \cdot \sqrt{H_{Hst}}}{3 \cdot \mu \cdot n \cdot T_2}}$$

$H_{Hst} = 38 \text{ m Hubhöhe}$
 $n = \text{gek. Querschnittsreibung} = \frac{1}{T_1} \text{ [m}^{-1/2}\text{]}$
 $Q = \text{Kammerfläche} = 1800 \text{ m}^2$



Zum maximalen Zufluß Q_{\max} gehörige Füllzeiten t_{\max}
bei verschiedenen Hubhöhen

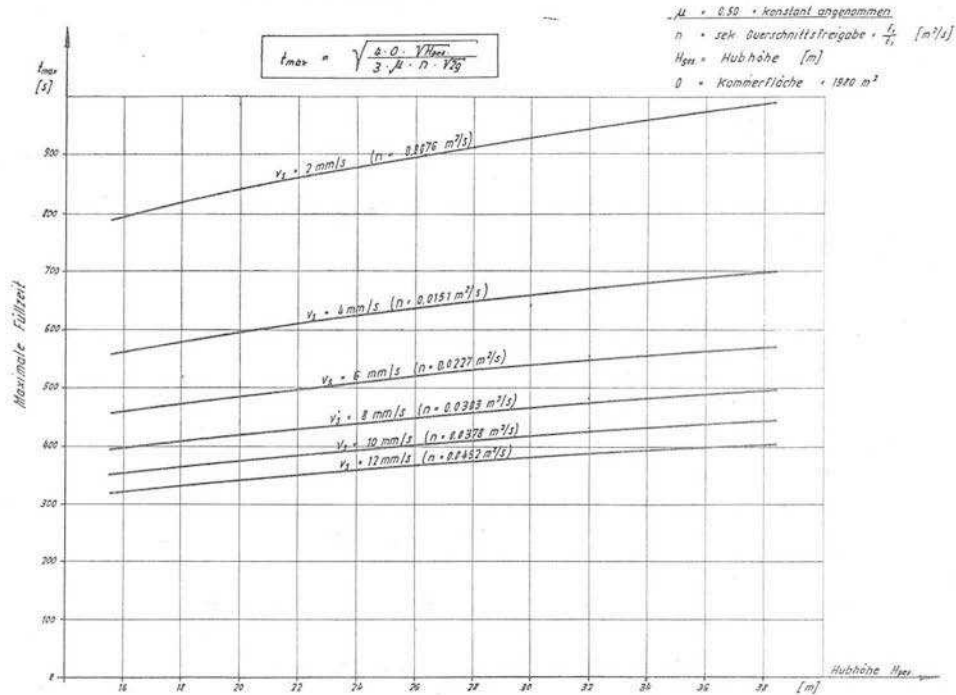


Abb. 44

Maximaler Zufluß während der Füllung bei verschiedenen Zuflußbeiwerten μ

$H_{\text{Hoe}} = 30 \text{ m}$ Hubhöhe
 $n =$ sek. Querschnittsbeiwerte $\cdot \frac{t_1}{t_2} \text{ [m/s]}$
 $\theta =$ Füllwasserfracht $\cdot \theta \cdot H_{\text{Hoe}} \text{ [m]}$
 $\theta =$ Kommerfläche $\cdot 1920 \text{ m}^2$

Freigabe des Füllquerschnittes $\frac{dF}{dt} = \text{konstant}$

$$Q_{\text{max}} = \sqrt{\frac{16}{25} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot n \cdot \theta \cdot \sqrt{H_{\text{Hoe}}}}$$

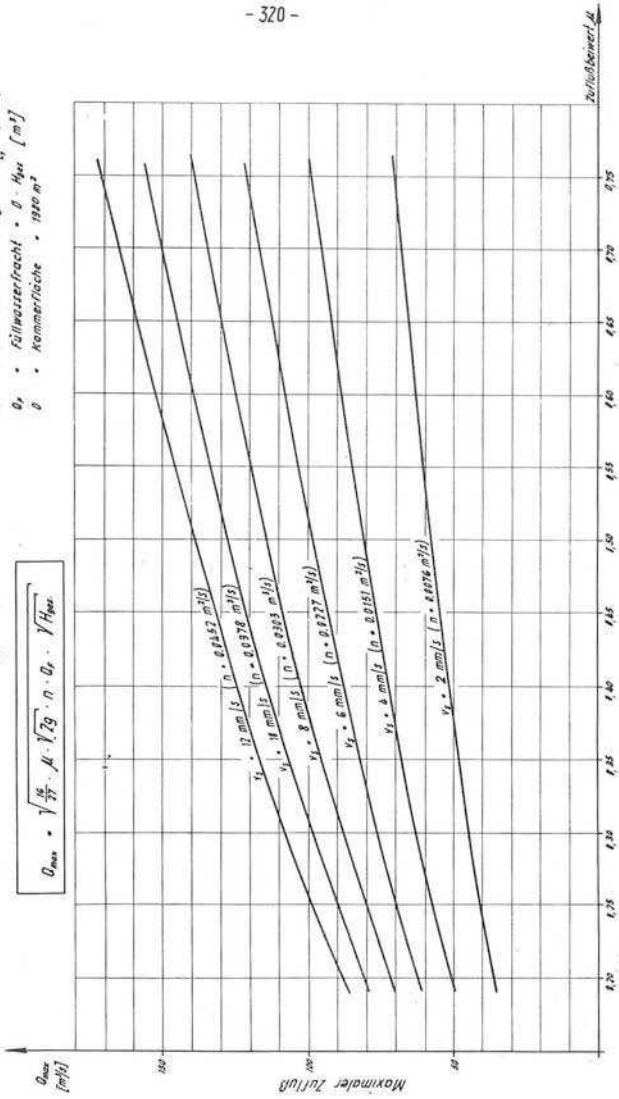


Abb 45

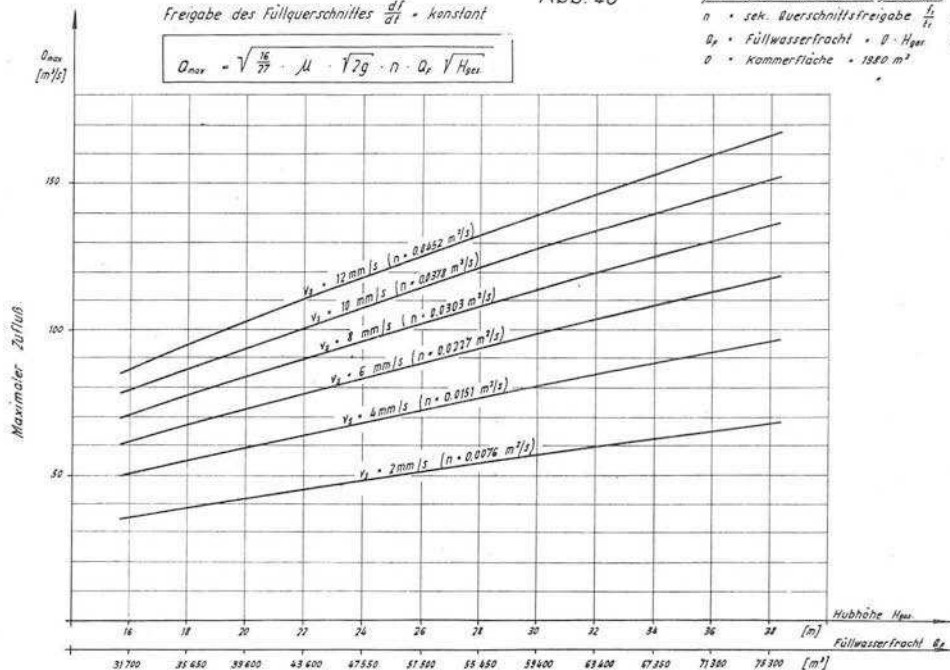
Maximaler Zufluß während der Füllung bei verschiedenen Hubhöhen

Abb. 46

Freigabe des Füllquerschnittes $\frac{df}{dt} = \text{konstant}$

$$Q_{\text{max}} = \sqrt{\frac{16}{27}} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot n \cdot Q_r \cdot \sqrt{H_{\text{ges}}}$$

$\mu = 0.50$ - konstant angenommen
 n - sek. Querschnittsfreigabe $\frac{f}{f_1}$ [m²/s]
 Q_r - Füllwasserfracht $\cdot \theta \cdot H_{\text{ges}}$ [m³]
 θ - Kammerfläche $\cdot 1880 \text{ m}^2$



Full- bzw. Leerzeiten T bei verschiedenen Zuflußbewerten μ

- $H_{\text{Hw}} = 30,0 \text{ m}$ Höhe
 $S = 1,46 \text{ m}$ Höhe Halbleiterschleife
 $f_1 = 955 \text{ m}^2$ Umfuhrgarabreit
 $D = 1811 \text{ m}^2$ Kompartimente
 $V_2 = \text{Wasserschwindigkeit Halbleiterschleife}$

$$T = 0,5 \frac{S}{V_2} + \frac{2 \cdot 0 \cdot \sqrt{H_{\text{Hw}}}}{\mu \cdot f_1 \cdot \sqrt{2g}}$$

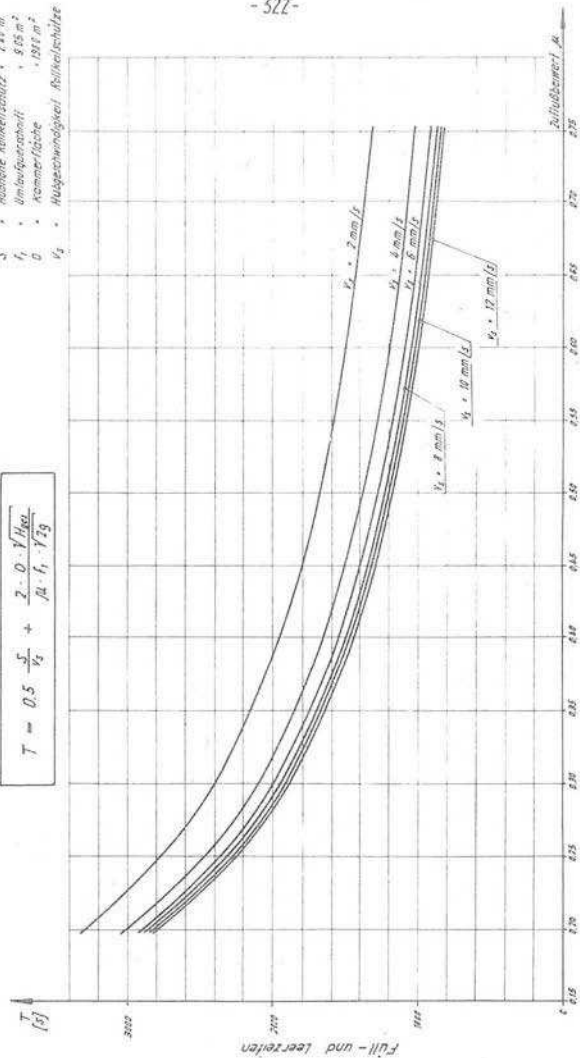


Abb. 47

Füll- bzw. Leerzeiten T bei verschiedenen Hubhöhen

- $\mu = 0,58$ - Konstant angenommen
- S - Hubhöhe Rollkeilschütz = 240 m
- f_1 - Umlaufgeschwindigkeit = 9,95 m/s
- Q - Kammerfläche = 1000 m²
- v_1 - Hubgeschwindigkeit Rollkeilschütze

$$T = 0,5 \frac{S}{v_1} + \frac{2 \cdot Q \cdot \sqrt{g \cdot S}}{\mu \cdot f_1 \cdot T \cdot g}$$

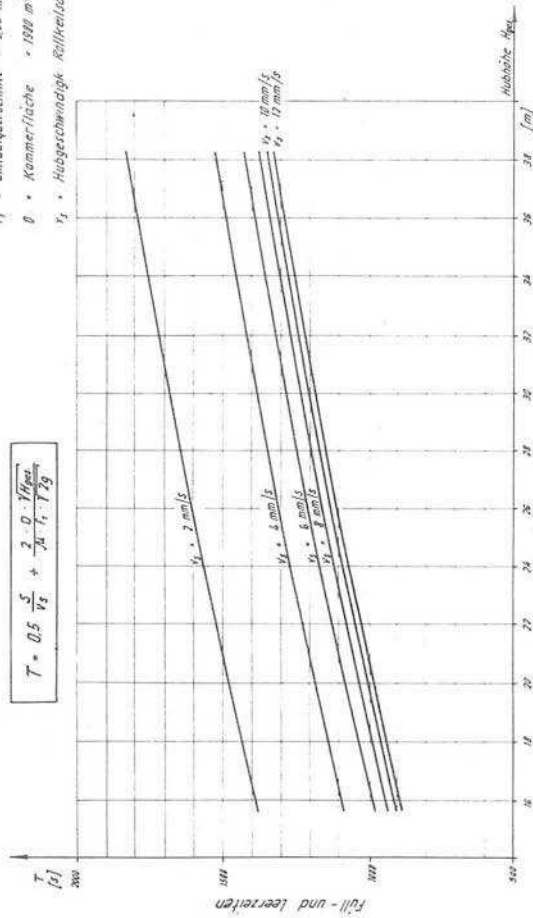


Abb. 48

Punktweise Ermittlung der Zufluß- und Füllkurven für eine
Hubgeschwindigkeit der Rollkeilschütze $v_s = 6 \text{ mm/s}$

$$\text{Zeit des gesamten Schützhubes } t_1 = \frac{S}{v_s} = \frac{2400 \text{ (mm)}}{6 \text{ (mm/s)}} = 400 \text{ s}$$

t (s)	$\mu f \cdot \sqrt{2g}$ (m^2)	h_m (m)	$Q = \mu f \sqrt{2g} \sqrt{h_m}$ (m^3/s)	$\Delta h = \frac{Q \cdot \Delta t}{O}$ (m)	$h - \Delta h$ (m)
0					30,000
20	0,37	29,990	2,03	0,020	29,980
40	1,04	29,951	5,69	0,057	29,923
60	1,89	29,871	10,31	0,104	29,819
80	2,86	29,740	15,60	0,158	29,661
100	3,92	29,553	21,30	0,216	29,445
120	5,06	29,306	27,40	0,277	29,168
140	6,25	28,998	33,65	0,340	28,828
160	7,49	28,626	40,10	0,404	28,424
180	8,76	28,189	46,50	0,470	27,954
200	10,03	27,687	52,90	0,534	27,420
220	11,30	27,123	58,90	0,594	26,826
240	12,57	26,500	64,60	0,653	26,173
260	13,81	25,818	70,30	0,710	25,463
280	15,00	25,084	75,00	0,758	24,705
300	16,14	24,303	79,60	0,804	23,901
320	17,20	23,480	83,25	0,842	23,059
340	18,17	22,623	86,40	0,872	22,187
360	19,02	21,739	88,60	0,895	21,292
380	19,69	20,838	<u>90,00</u>	0,908	20,384
400	20,06	19,932	89,55	0,905	19,479
420		19,037	87,50	0,884	18,595
440		18,163	85,50	0,864	17,731
460	20,06	17,310	83,50	0,843	16,888
		16,476	81,45	0,824	

t	$\mu \cdot f \cdot \sqrt{2g}$	h_m	$Q = \mu \cdot f \cdot \sqrt{2g} \sqrt{h_m}$	$\Delta h = \frac{Q \cdot \Delta t}{O}$	$h - \Delta h$
(s)	(m ²)	(m)	(m ³ /s)	(m)	(m)
480	20,06	15,663	79,40	0,802	16,064
500		14,872	77,40	0,780	15,262
520		14,102	75,35	0,761	14,482
540		13,351	73,30	0,740	13,721
560		12,621	71,25	0,720	12,981
580		11,911	69,20	0,700	12,261
600		11,221	67,15	0,679	11,561
620		10,552	65,10	0,659	10,882
640		9,904	63,05	0,638	10,223
660		9,277	61,00	0,616	9,585
680		8,671	59,00	0,596	8,969
700		8,085	57,00	0,576	8,373
720		7,519	55,00	0,556	7,797
740		6,973	53,00	0,535	7,241
760		6,449	51,00	0,514	6,706
780		5,945	48,95	0,494	6,192
800		5,462	46,90	0,473	5,698
820		4,998	44,90	0,453	5,225
840		4,556	42,85	0,433	4,772
860		4,133	40,85	0,412	4,339
880		3,731	38,80	0,392	3,927
900		3,349	36,75	0,371	3,535
920		2,989	34,70	0,351	3,164
940		2,648	32,65	0,330	2,813
960		2,328	30,65	0,310	2,483
980		2,028	28,60	0,289	2,173
1000	20,06				1,884

t	$\mu \cdot f \cdot \sqrt{2g}$	h_m	$Q = \mu \cdot f \cdot \sqrt{2g} \sqrt{h_m}$	$\Delta h = \frac{Q \cdot \Delta t}{O}$	$h - \Delta h$
(s)	(m^2)	(m)	(m^3/s)	(m)	(m)
1000	20,06 ↓	1,750	26,55	0,268	1,884
1020		1,492	24,50	0,248	1,616
1040		1,255	22,45	0,227	1,368
1060		1,037	20,45	0,207	1,141
1080		0,841	18,40	0,186	0,934
1100		0,666	16,38	0,165	0,748
1120		0,510	14,36	0,145	0,583
1140		0,375	12,33	0,125	0,438
1160		0,261	10,30	0,104	0,313
1180		0,168	8,20	0,083	0,209
1200		0,095	6,18	0,063	0,126
1220		0,042	4,13	0,042	0,063
1240		0,0105	2,06	0,021	0,021
1260					0,000

Max. sekundliche Zunahme des Zuflusses

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{\max} = \frac{40,10 - 33,65 \text{ (m}^3/\text{s)}}{150 - 130 \text{ (s)}} = \frac{6,45 \text{ (m}^3/\text{s)}}{20 \text{ (s)}} = 0,32 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$$

Max. Steigegeschwindigkeit des Wassers in der Kammer

$$\left(\frac{\Delta H}{\Delta t}\right)_{\max} = s_{\max} = \frac{22,19 - 19,48 \text{ (m)}}{400 - 340 \text{ (s)}} = \frac{2,71 \text{ (m)}}{60 \text{ (s)}} = 4,5 \text{ (cm/s)}$$

Verhältnis s_m/s_{\max}

$$s_m = \text{mittlere Steigegeschwindigkeit} = \frac{30,0 \text{ (m)}}{1270 \text{ (s)}} = 2,4 \text{ (cm/s)}$$

$$s_m/s_{\max} = 2,4 : 4,5 = 1 : 1,88$$

Verhältnis Q_m/Q_{\max}

$$Q_m = \text{mittlere Zufluß} = \frac{1980 \cdot 30 \text{ (m}^3\text{)}}{1270 \text{ (s)}} = 46,8 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$Q_m/Q_{\max} = 46,8 : 90,1 = 1 : 1,92$$

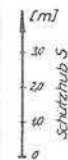
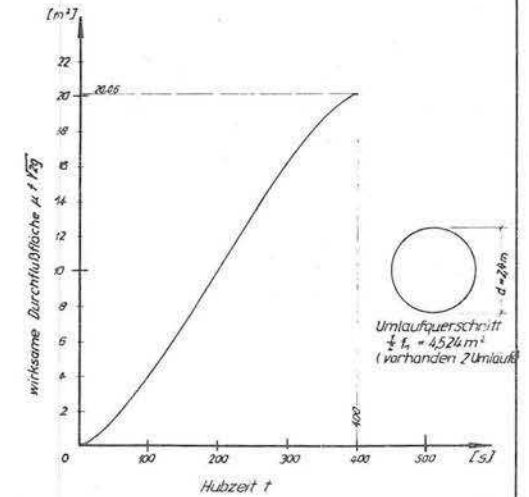
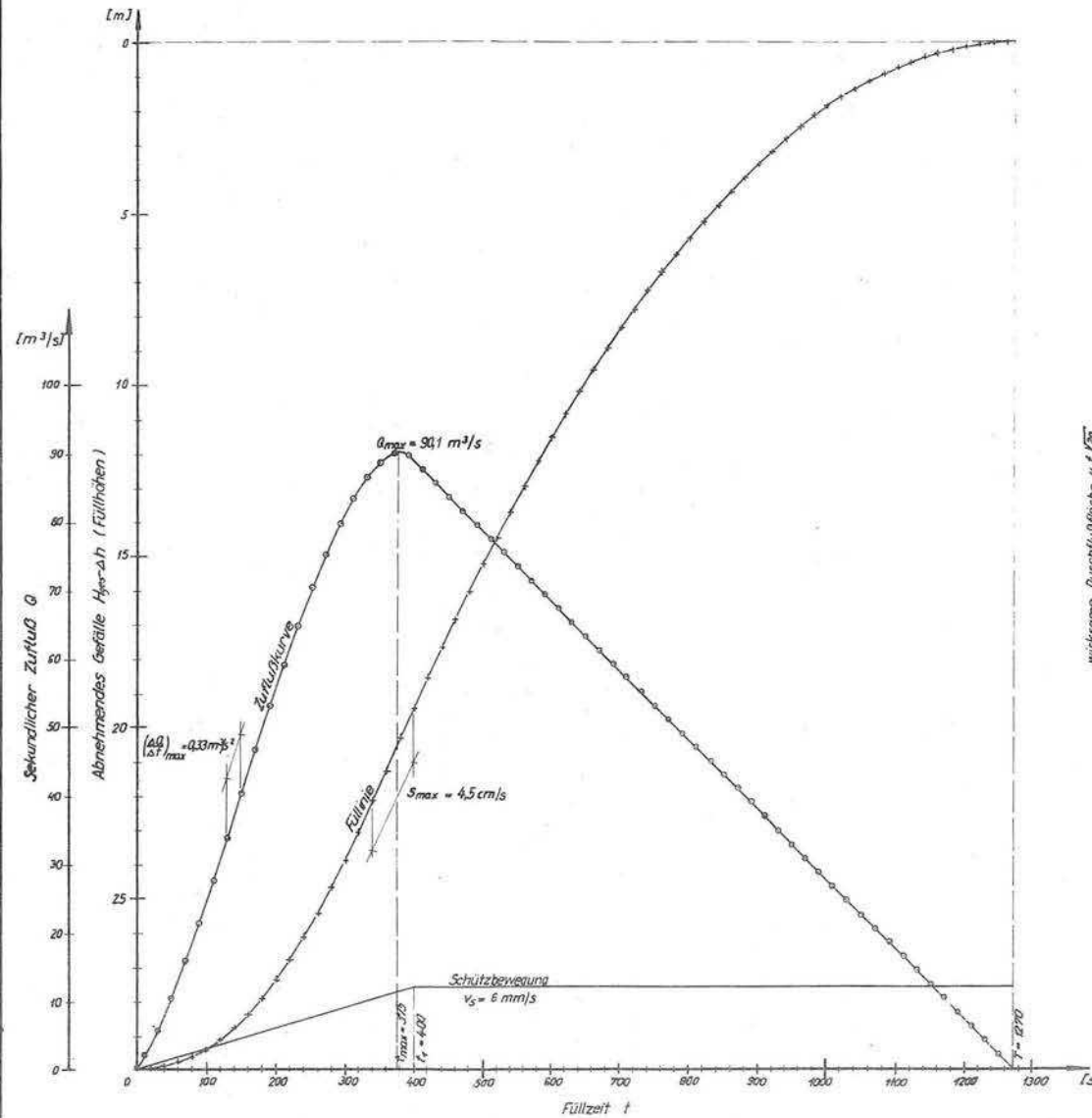
Abb. 50

Füllungsberechnung für eine Schleuse 16,5m x 12m mit $H_{ges} = 30,0m$

Punktweise Ermittlung der Zufluß- und Füllkurve aus dem abnehmenden Druckgefälle h_m

Hubgeschwindigkeit der Rollkeilschütze $v_s = 6mm/s$

$\mu = 0,5$ = konstant angenommen



Punktweise Ermittlung der Zufluß- und Füllkurven für eine
Hubgeschwindigkeit der Rollkeilschütze $v_s = 12 \text{ mm/s}$

Zeit des gesamten Schützenhubes $t_1 = \frac{S}{v_s} = \frac{2400 \text{ (mm)}}{12 \text{ (mm/s)}} = 200 \text{ (s)}$

t	$\mu f \sqrt{2g}$	h_m	$Q = \mu f \sqrt{2g} \sqrt{h_m}$	$\Delta h = \frac{Q \cdot \Delta t}{O}$	$h - \Delta h$
(s)	(m^2)	(m)	(m^3/s)	(m)	(m)
0					30,000
20	1,04	29,971	5,694	0,058	29,942
40	2,86	29,863	15,63	0,158	29,784
60	5,06	29,645	27,55	0,278	29,506
80	7,49	29,301	40,55	0,410	29,096
100	10,03	28,824	53,85	0,544	28,552
120	12,57	28,215	66,77	0,674	27,878
140	15,00	27,481	78,64	0,794	27,084
160	17,20	26,635	88,77	0,897	26,187
180	19,02	25,700	96,42	0,974	25,213
200	20,06	24,709	100,00	1,007	24,206
220		23,712	98,00	0,991	23,215
240		22,730	95,90	0,968	22,247
260		21,772	93,90	0,948	21,299
280		20,835	91,80	0,928	20,371
300		19,906	89,60	0,904	19,454
320		19,012	87,47	0,883	18,571
340		18,139	85,44	0,863	17,708
360		17,286	83,43	0,843	16,865
380		16,454	81,38	0,822	16,043
400		15,642	79,35	0,801	15,242
420		14,852	77,31	0,781	14,461
440		14,081	75,27	0,760	13,701
460		13,331	73,26	0,740	12,961
480	20,06	12,602	71,21	0,719	12,242

t (s)	$\mu f \sqrt{2g}$ (m ²)	h_m (m)	$Q = \mu f \sqrt{2g} \sqrt{h_m}$ (m ³ /s)	$\Delta h = \frac{Q \cdot \Delta t}{O}$ (m)	$h - \Delta h$ (m)
480	20,06	11,893	69,19	0,699	12,242
500		11,204	67,14	0,678	11,543
520		10,536	65,11	0,658	10,865
540		9,888	63,07	0,637	10,207
560		9,261	61,04	0,617	9,570
580		8,655	59,02	0,596	8,953
600		8,069	56,97	0,575	8,357
620		7,504	54,94	0,555	7,782
640		6,959	52,92	0,535	7,227
660		6,435	50,87	0,514	6,692
680		5,931	48,85	0,493	6,178
700		5,448	46,82	0,473	5,685
720		4,986	44,79	0,452	5,212
740		4,544	42,73	0,432	4,760
760		4,123	40,74	0,411	4,328
780		3,721	38,70	0,391	3,917
800		3,341	36,67	0,370	3,526
820		2,981	34,64	0,350	3,156
840		2,641	32,60	0,329	2,806
860		2,322	30,57	0,309	2,477
880		2,024	28,55	0,288	2,168
900	20,06	1,746	26,50	0,268	1,880
920		1,488	24,47	0,247	1,612
940		1,252	22,45	0,227	1,365
960		1,035	20,40	0,206	1,138
980		0,839	18,37	0,186	0,932
1000					0,746

t	$\mu f \sqrt{2g}$	h_m	$Q = \mu f \sqrt{2g} \sqrt{h_m}$	$\Delta h = \frac{Q \cdot \Delta t}{0}$	$h - \Delta h$
(s)	(m ²)	(m)	(m ³ /s)	(m)	(m)
1000	20,06	0,663	16,30	0,165	0,746
1020		0,509	14,29	0,144	0,581
1040		0,375	12,27	0,124	0,437
1060		0,261	10,22	0,104	0,313
1080		0,167	8,19	0,083	0,209
1100		0,095	6,03	0,061	0,126
1120		0,044	4,19	0,042	0,065
1140		0,011	2,15	0,022	0,023
1160		0,000	0,00	0,000	0,001
1180					0,000

Maximale sekundliche Zunahme des Zuflusses

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{\max} = \frac{66,77 - 27,55 \text{ (m}^3/\text{s)}}{110 - 50 \text{ (s)}} = \frac{39,22 \text{ (m}^3/\text{s)}}{60 \text{ (s)}} = 0,65 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$$

Maximale Steigegeschwindigkeit des Wassers in der Kammer

$$\left(\frac{\Delta H}{\Delta t}\right)_{\max} = s_{\max} = \frac{26,19 - 23,22 \text{ (m)}}{220 - 160 \text{ (s)}} = \frac{2,97 \text{ (m)}}{60 \text{ (s)}} = 4,95 \text{ (cm/s)}$$

$$= 5,0 \text{ (cm/s)}$$

Verhältnis s_m/s_{\max}

$$s_m = \text{mittlere Steigegeschwindigkeit} = \frac{30,0 \text{ (m)}}{1170 \text{ (s)}} = 2,57 \text{ (cm/s)}$$

$$s_m/s_{\max} = 2,57 : 4,95 = 1 : 1,93$$

Verhältnis Q/Q_{\max}

$$Q_m = \text{mittlerer Zufluß} = \frac{1980 \cdot 30,0 \text{ (m}^3\text{)}}{1170 \text{ (s)}} = 50,8 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$Q_m/Q_{\max} = 50,8 : 100,20 = 1 : 1,97$$

t (s)	$\mu f \sqrt{2g}$ (m ²)	h_m (m)	$Q = \mu f \sqrt{2g} \sqrt{h_m}$ (m ³ /s)	$\Delta h = \frac{Q \cdot \Delta t}{O}$ (m)	$h - \Delta h$ (m)
480	20,06	11,893	69,19	0,699	12,242
500		11,204	67,14	0,678	11,543
520		10,536	65,11	0,658	10,865
540		9,888	63,07	0,637	10,207
560		9,261	61,04	0,617	9,570
580		8,655	59,02	0,596	8,953
600		8,069	56,97	0,575	8,357
620		7,504	54,94	0,555	7,782
640		6,959	52,92	0,535	7,227
660		6,435	50,87	0,514	6,692
680		5,931	48,85	0,493	6,178
700		5,448	46,82	0,473	5,685
720		4,986	44,79	0,452	5,212
740		4,544	42,73	0,432	4,760
760		4,123	40,74	0,411	4,328
780		3,721	38,70	0,391	3,917
800		3,341	36,67	0,370	3,526
820		2,981	34,64	0,350	3,156
840		2,641	32,60	0,329	2,806
860		2,322	30,57	0,309	2,477
880		2,024	28,55	0,288	2,168
900		1,746	26,50	0,268	1,880
920		1,488	24,47	0,247	1,612
940		1,252	22,45	0,227	1,365
960		1,035	20,40	0,206	1,138
980		0,839	18,37	0,186	0,932
1000	20,06	0,839	18,37	0,186	0,746

t	$\mu f \sqrt{2g}$	h_m	$Q = \mu f \sqrt{2g} \sqrt{h_m}$	$\Delta h = \frac{Q \cdot \Delta t}{0}$	$h - \Delta h$
(s)	(m ²)	(m)	(m ³ /s)	(m)	(m)
1000	20,06	0,663	16,30	0,165	0,746
1020		0,509	14,29	0,144	0,581
1040		0,375	12,27	0,124	0,437
1060		0,261	10,22	0,104	0,313
1080		0,167	8,19	0,083	0,209
1100		0,095	6,03	0,061	0,126
1120		0,044	4,19	0,042	0,065
1140		0,011	2,15	0,022	0,023
1160		0,000	0,00	0,000	0,001
1180		0,000	0,00	0,000	0,000

Maximale sekundliche Zunahme des Zuflusses

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{\max} = \frac{66,77 - 27,55 \text{ (m}^3/\text{s)}}{110 - 50 \text{ (s)}} = \frac{39,22 \text{ (m}^3/\text{s)}}{60 \text{ (s)}} = 0,65 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$$

Maximale Steigegeschwindigkeit des Wassers in der Kammer

$$\left(\frac{\Delta H}{\Delta t}\right)_{\max} = s_{\max} = \frac{26,19 - 23,22 \text{ (m)}}{220 - 160 \text{ (s)}} = \frac{2,97 \text{ (m)}}{60 \text{ (s)}} = 4,95 \text{ (cm/s)}$$

$$= 5,0 \text{ (cm/s)}$$

Verhältnis s_m/s_{\max}

$$s_m = \text{mittlere Steigegeschwindigkeit} = \frac{30,0 \text{ (m)}}{1170 \text{ (s)}} = 2,57 \text{ (cm/s)}$$

$$s_m/s_{\max} = 2,57 : 4,95 = 1 : 1,93$$

Verhältnis Q/Q_{\max}

$$Q_m = \text{mittlerer Zufluß} = \frac{1980 \cdot 30,0 \text{ (m}^3\text{)}}{1170 \text{ (s)}} = 50,8 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$Q_m/Q_{\max} = 50,8 : 100,20 = 1 : 1,97$$

Abb. 52

Füllungsberechnung für eine Schleuse 165m x 12m mit $H_{ges} = 30,0$ m

Punktwise Ermittlung der Zufluß- und Füllkurve aus dem abnehmendem Druckgefälle h_m

Hubgeschwindigkeit der Rollkeilschütze $v_s = 12$ mm/s
 $\mu = 0,5$ = konstant angenommen

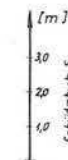
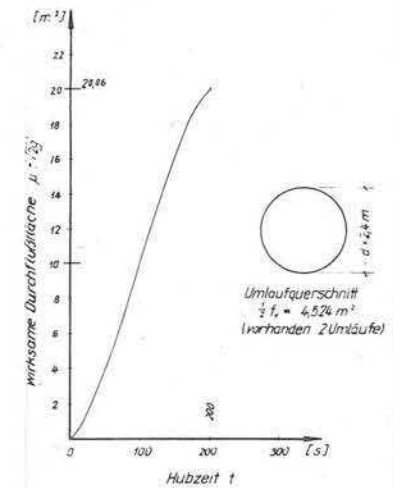
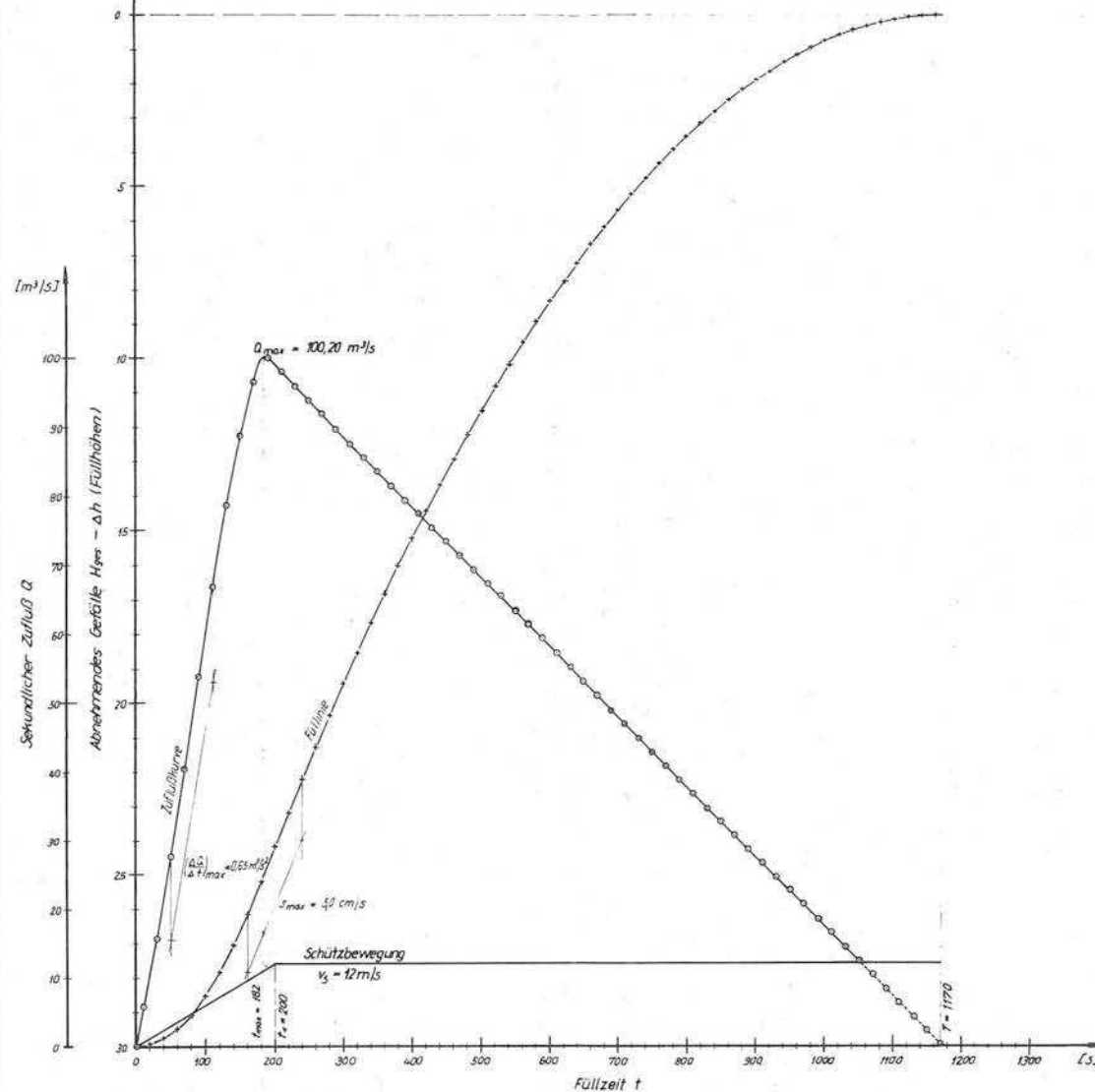


Abb. 54

Maximale Steiggeschwindigkeit des Kammerspiegels aus analytischem Verfahren und Modellversuchen

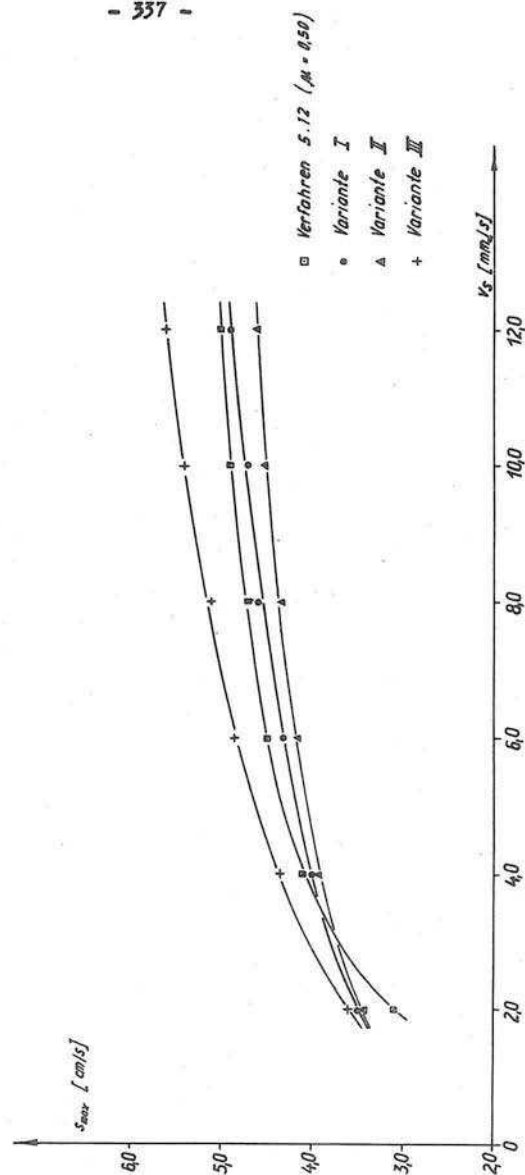


Abb. 53

Füll- und Zuflußkurve aus Modellversuchen für $v_s = 12 \text{ mm/s}$

Füll- und Entleerungssystem : Variante I

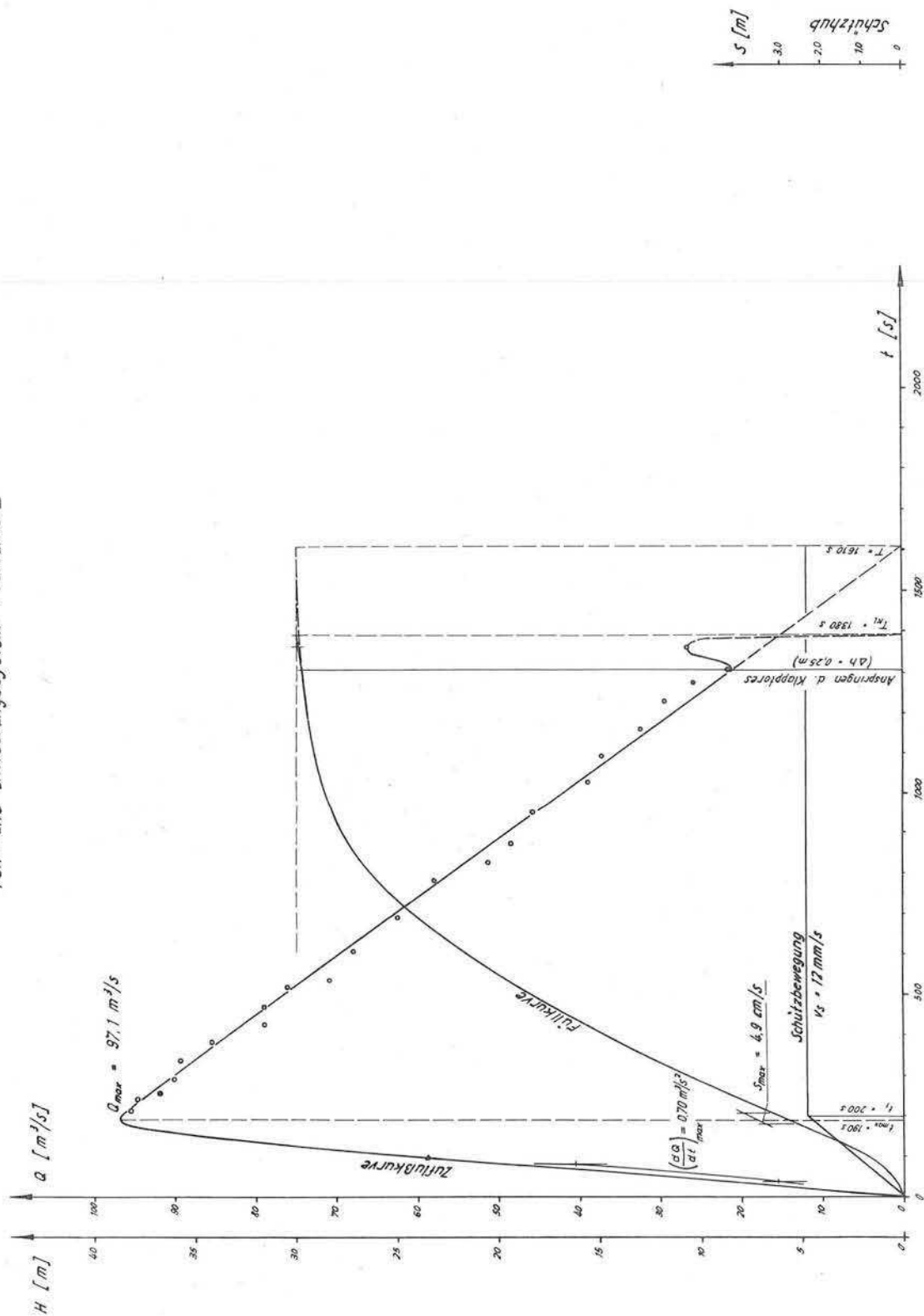


Abb. 55

Maximaler Zufluß Q_{\max} aus analytischen Verfahren und Modellversuchen

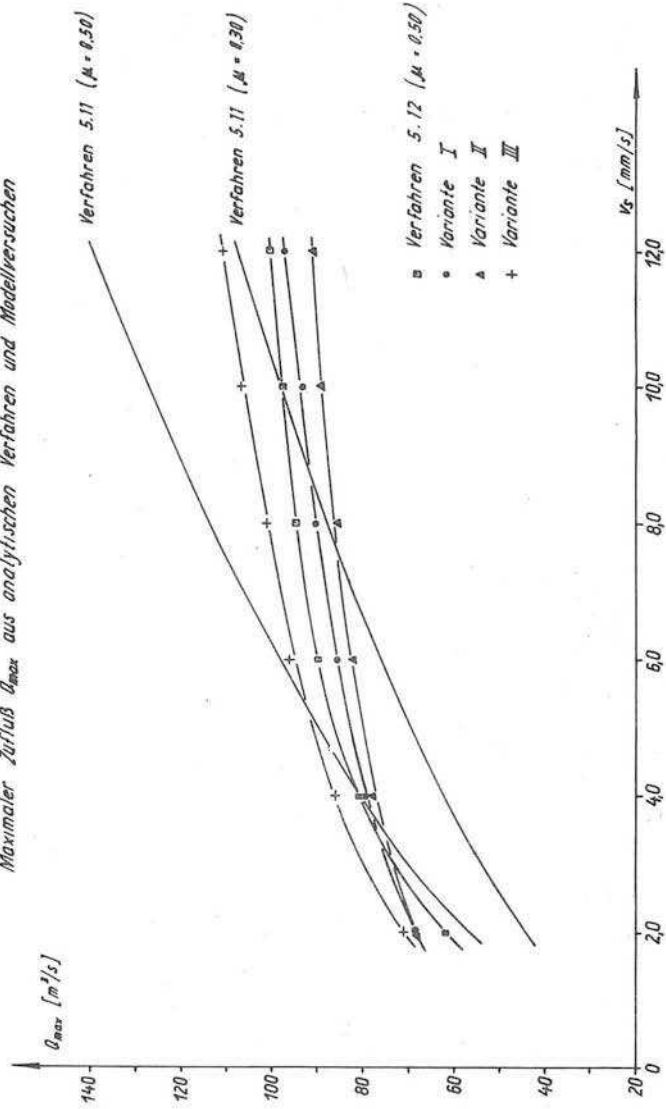


Abb. 56

Zu Q_{max} gehörige Füllzeiten t_{max} aus analytischen Verfahren und Modellversuchen

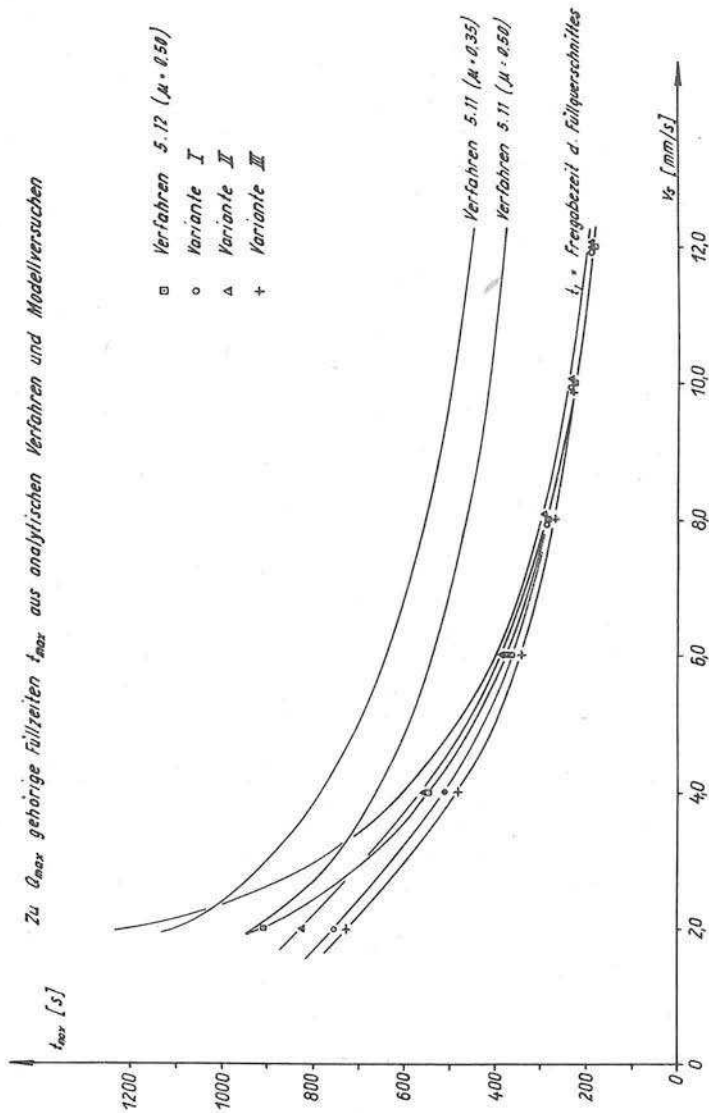


Abb. 57
Maximale sekundl. Zunahme des Zuflusses $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\max}$ bzw. $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\max}$ aus analytischen Verfahren und Modellversuchen

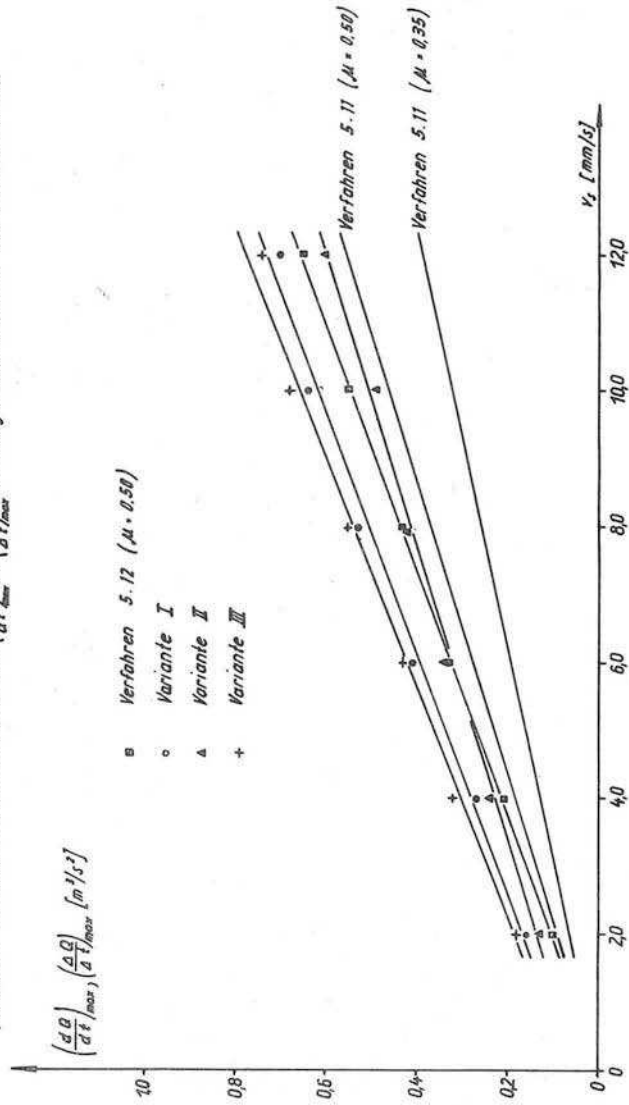


Abb. 58

Füllzeiten T aus analytischen Verfahren und Modellversuchen

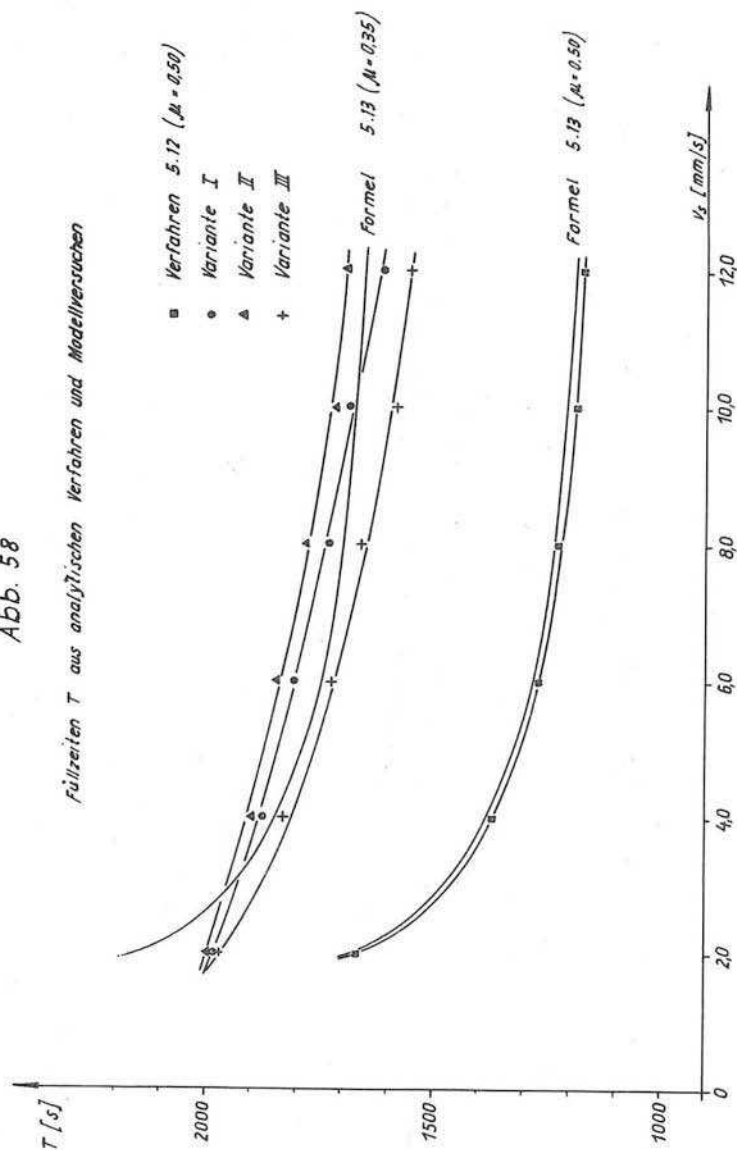
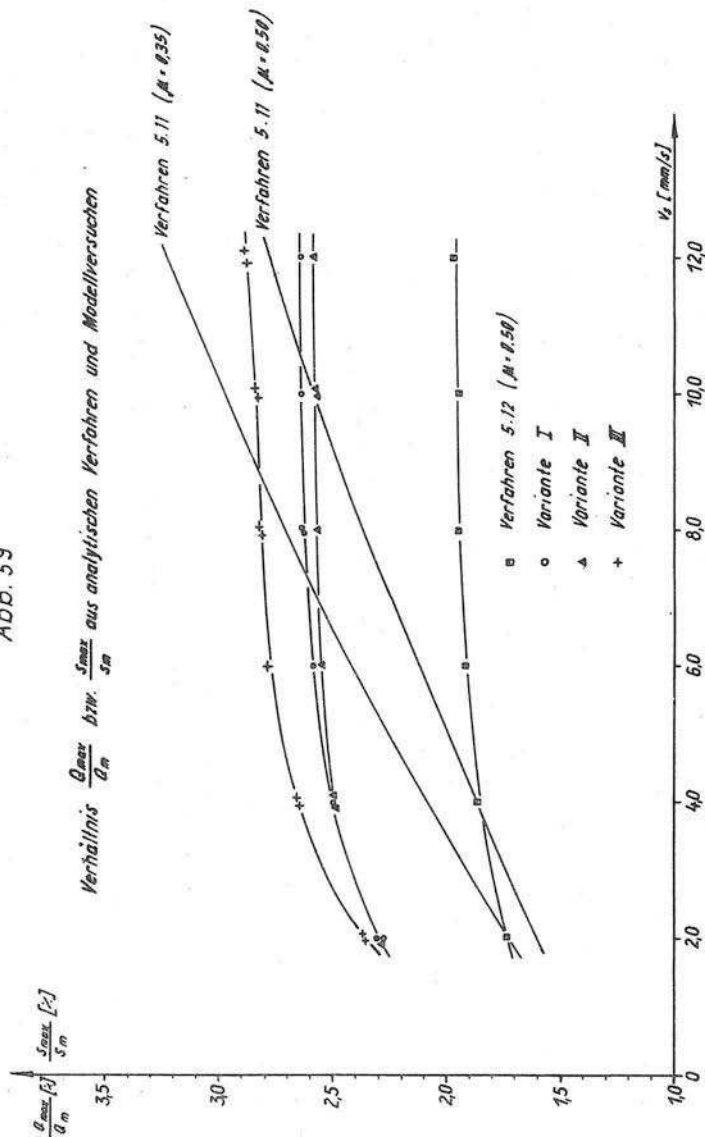
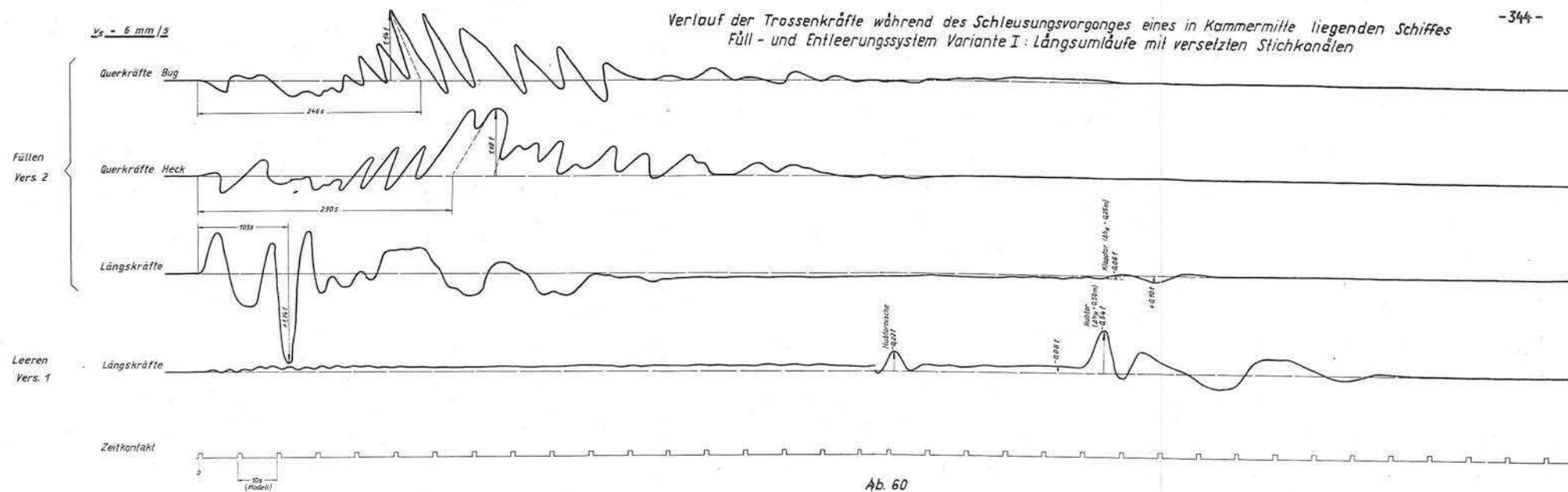


Abb. 59

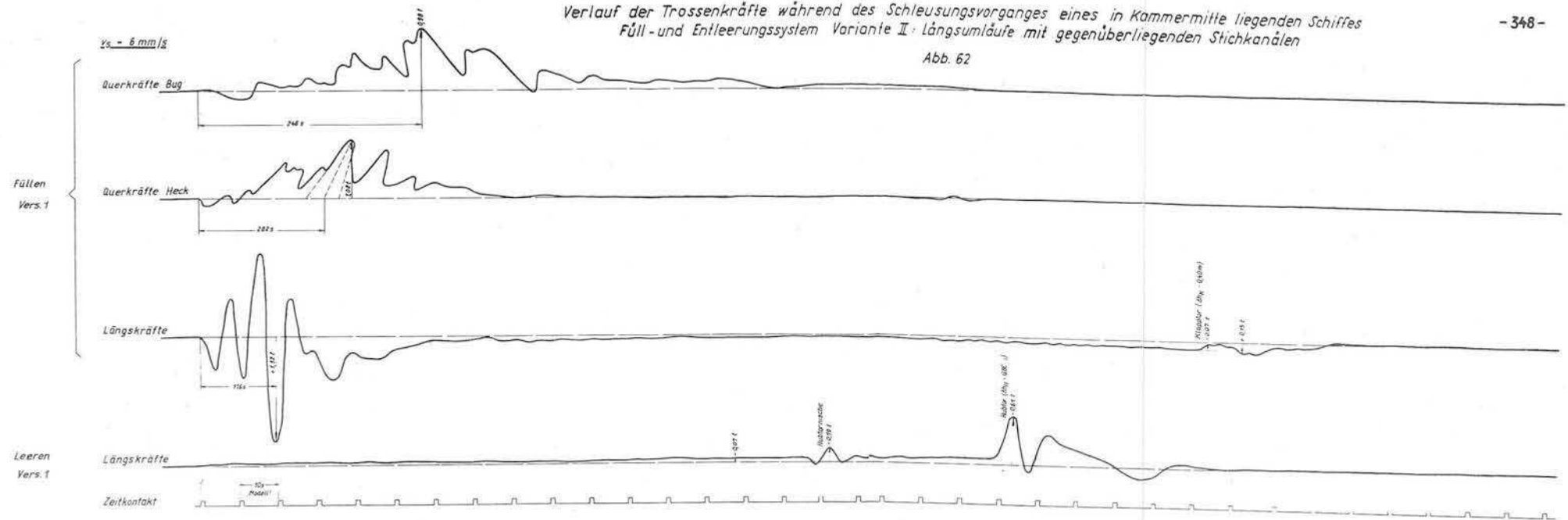


Verlauf der Trassenkräfte während des Schleusungsvorganges eines in Kammermitte liegenden Schiffes
Füll- und Entleerungssystem Variante I: Langsumläufe mit versetzten Stichkanälen

$$\underline{v_s = 6 \text{ mm/s}}$$


Verlauf der Trossenkräfte während des Schleusungsvorganges eines in Kammermitte liegenden Schiffes
Füll- und Entleerungssystem Variante II: Längsumläufe mit gegenüberliegenden Stichkanälen

Abb. 62



Verlauf der Trossenkräfte während des Schleusungsvorganges eines in Kammermitte liegenden Schiffes
Füll- und Entleerungssystem Variante III: Grundlauf

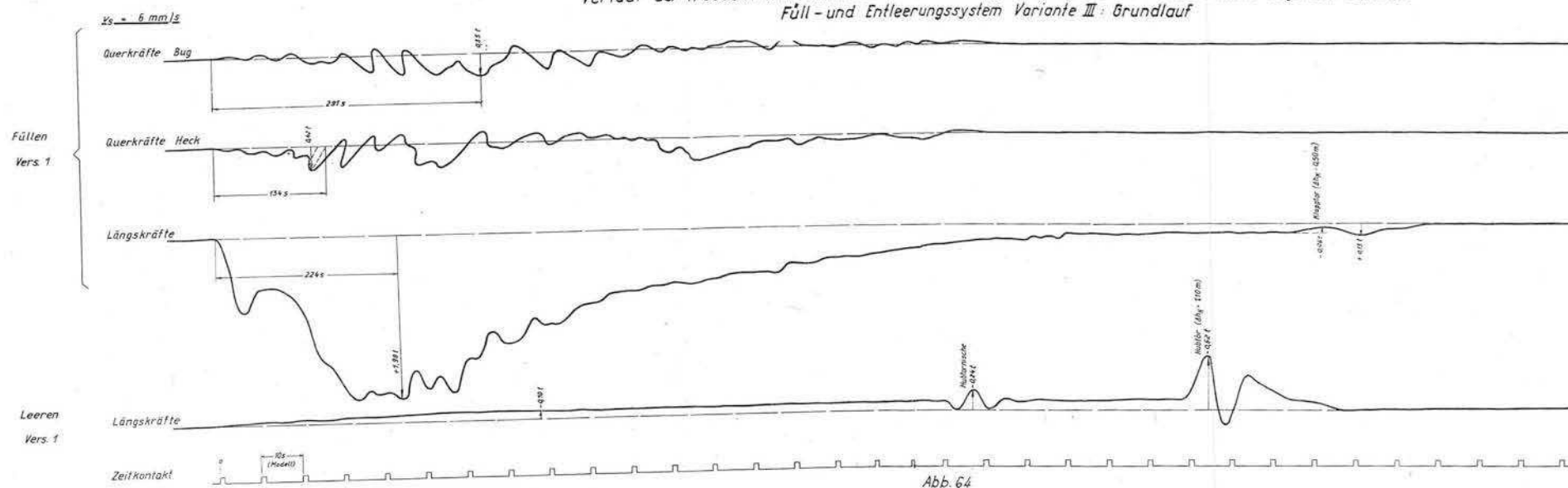
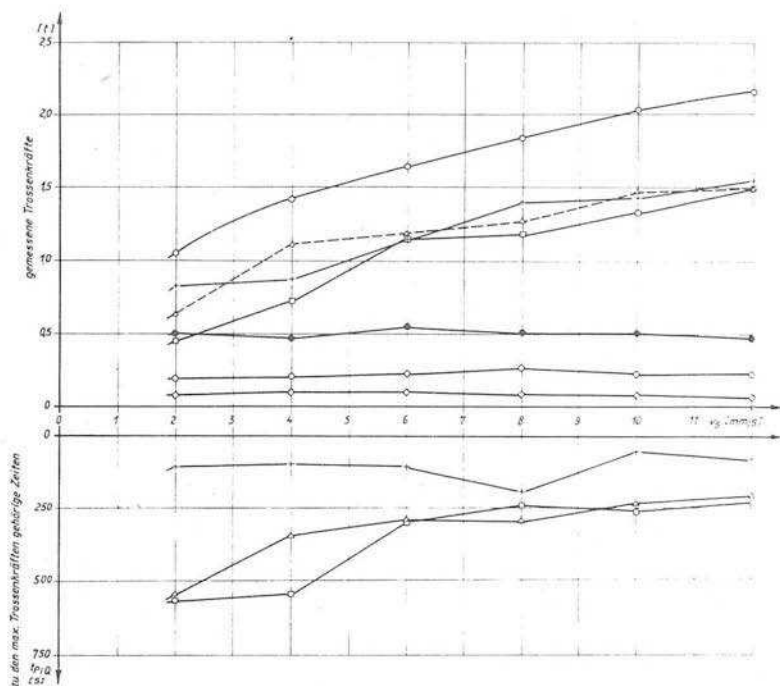


Abb. 64

Schleusen mit hohem Gefälle

Ergebnisse der Trossenkraftmessungen eines in Kammermitte liegenden Schiffes
(Schleusenmodell Variante I)



Trossenkraft

- max. res. Trossenkraft P
- max. Querkraft Bug G_g
- △ max. Querkraft Heck G_H
- + max. Längskraft P
- ◇ max. Kraft durch Schwall infolge Klappe:
Wasserspiegeldifferenz $\Delta h_K = 0,25 \text{ m}$
- ◇ max. Kraft durch Hubtornische
- max. Kraft durch Schwall infolge Hubtor:
Wasserspiegeldifferenz $\Delta h_H = 0,50 \text{ m}$

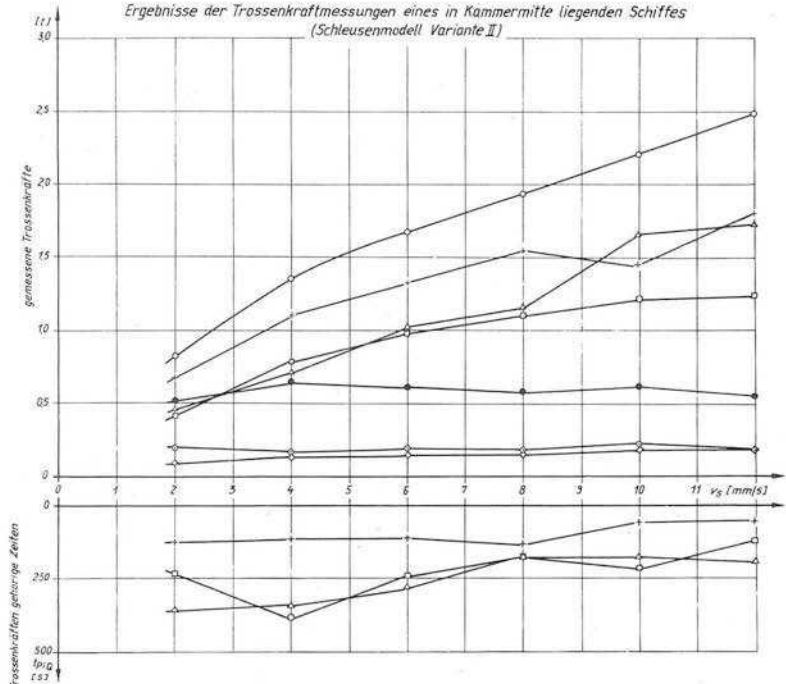
Zeiten

- zu max. G_g gehörige Zeiten
- △ zu max. G_H gehörige Zeiten
- + zu max. P gehörige Zeiten

Abb. 66

Schleusen mit hohem Gefälle

Ergebnisse der Trossenkraftmessungen eines in Kammermitte liegenden Schiffes
(Schleusenmodell Variante II)



Trossenkraft

- max. res. Trossenkraft P
- max. Querkraft Bug Q_B
- △ max. Querkraft Heck Q_H
- + max. Längskraft P
- max. Kraft durch Schwall infolge Klappes:
Wasserspiegeldifferenz $\Delta h_K = 0,50\text{ m}$ bei $v_s = 2\text{ mm/s}$
 $\Delta h_K = 0,40\text{ m}$ bei $v_s = 4$ bis 12 mm/s
- max. Kraft durch Hubtor:
- max. Kraft durch Schwall infolge Hubtor:
Wasserspiegeldifferenz $\Delta h_H = 0,70\text{ m}$ bei $v_s = 2\text{ mm/s}$
 $\Delta h_H = 0,80\text{ m}$ bei $v_s = 4$ bis 12 mm/s

Zeiten

- zu max. Q_B gehörige Zeiten
- △ zu max. Q_H gehörige Zeiten
- + zu max. P gehörige Zeiten

Abb. 67

Schleuse mit hohem Gefälle

Ergebnisse der Trossenkraftmessungen eines in Kammermitte liegenden Schiffes
(Schleusenmodell Variante III)

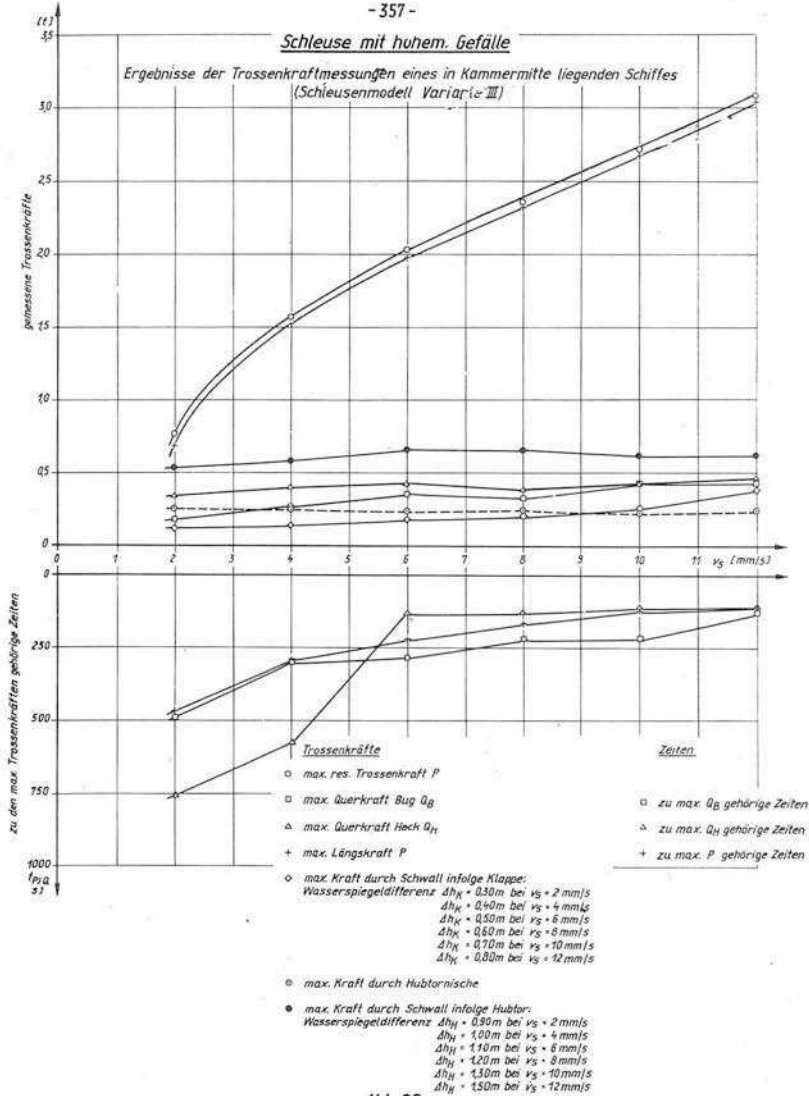


Abb. 68

Schleusen mit hohem Gefälle

Maximale resultierende Trossenkräfte (Längs- und Querkräfte) eines in Kammermitte liegenden Schiffes bei verschiedenen Füll- und Entleerungssystemen
(aus Messungen am Schleusenmodell)

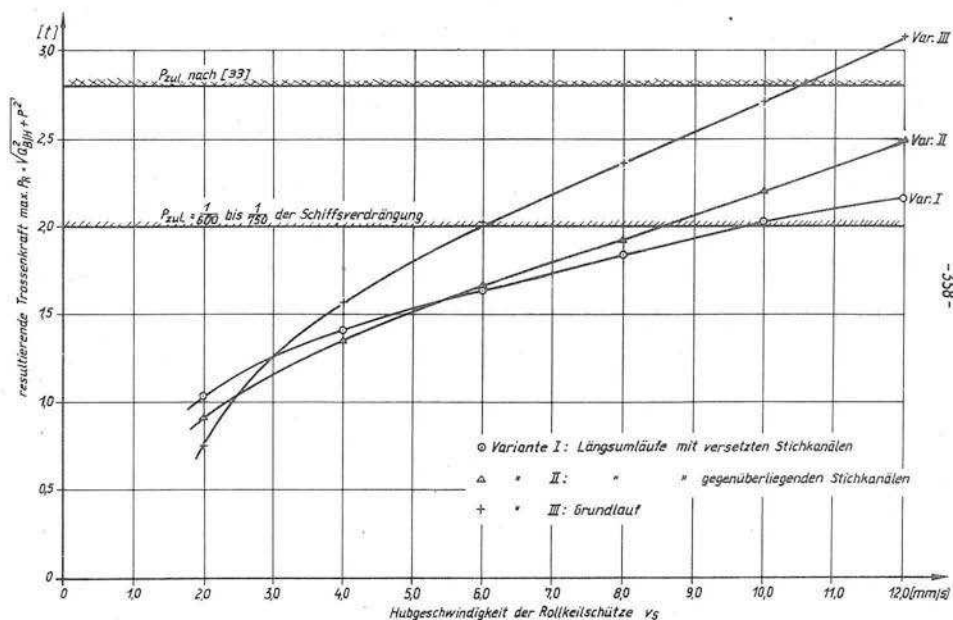


Abb. 69

Abb. 70

Maximale Sunktiefen im Oberhafen beim Füllen der Kammer
nach analytischen Verfahren und Modellversuchen

Füll- und Entleerungssystem: Variante I

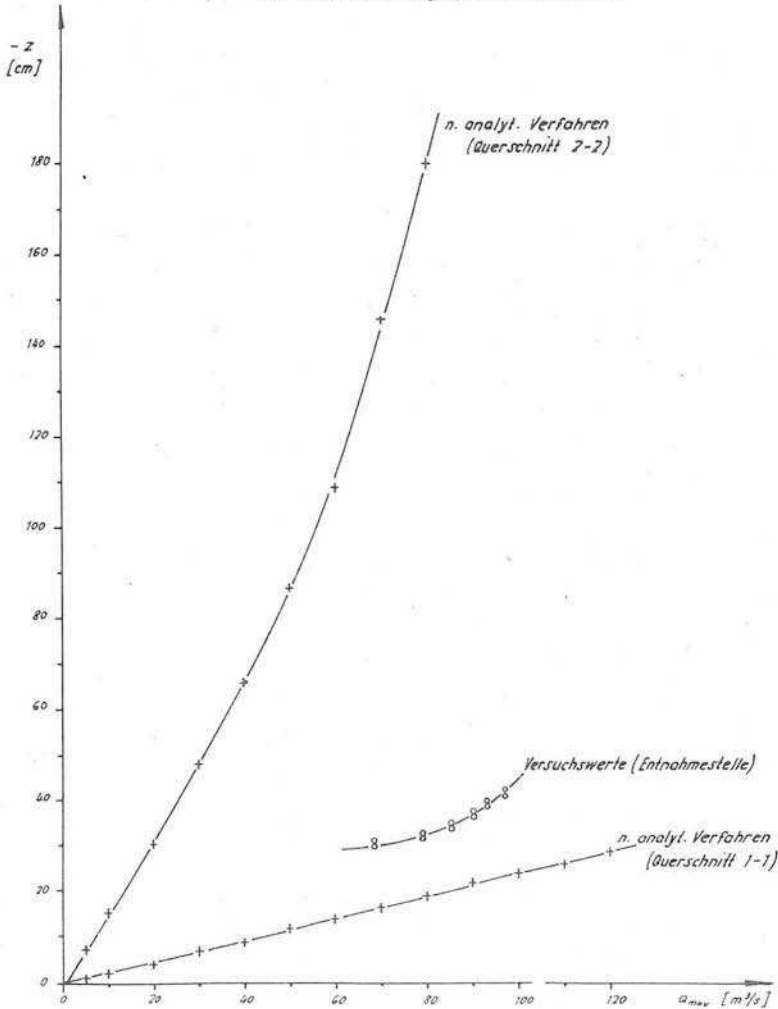


Abb. 71
Maximale Sunktiefen im Oberhafen beim Füllen der Kammer und maximale Schwallhöhen im Unterhafen beim Leeren
der Kammer aus Modellversuchen

Füll- und Entleerungssystem: Variante I

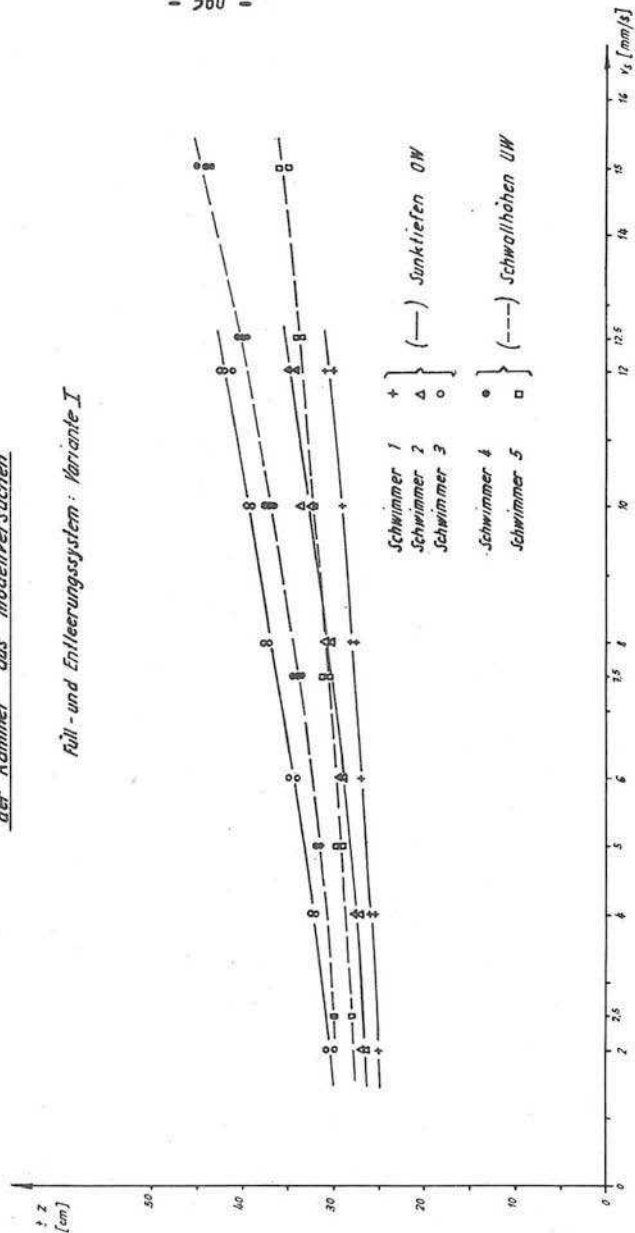
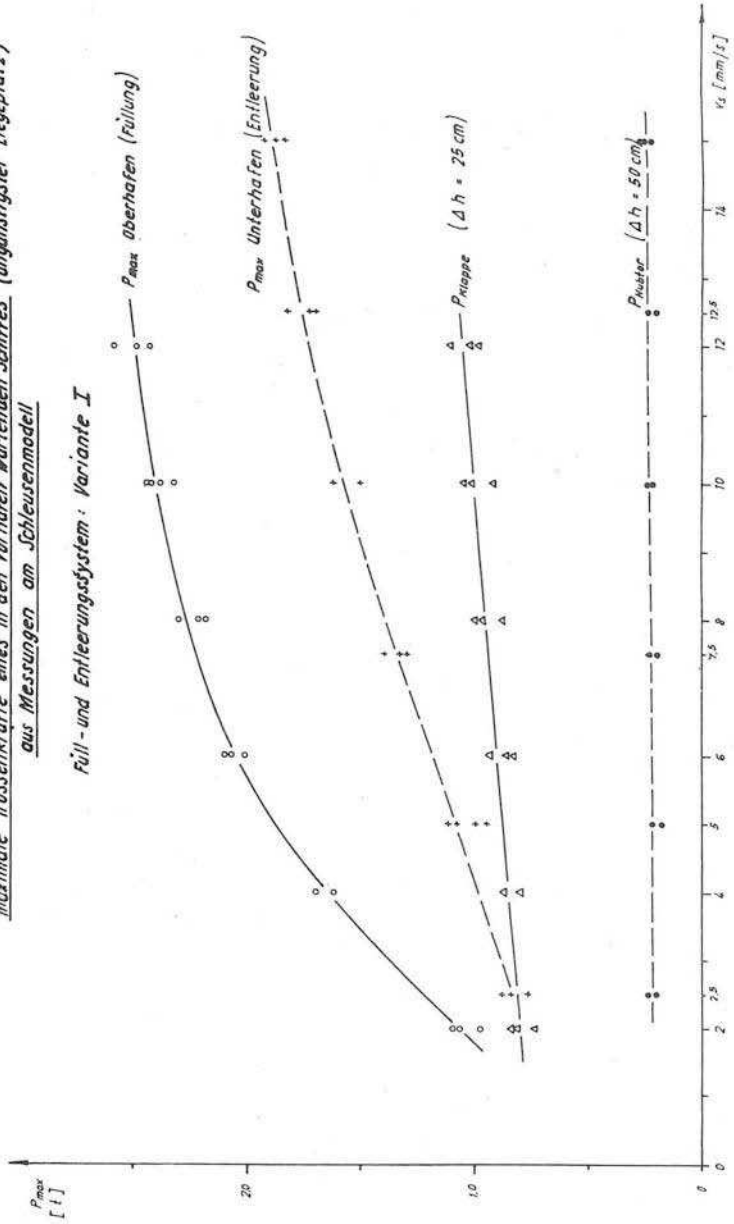


Abb. 72
 Maximale Trossenkräfte eines in den Vorhafen wartenden Schiffes (ungünstigster Liegeplatz)
 aus Messungen am Schleusenmodell

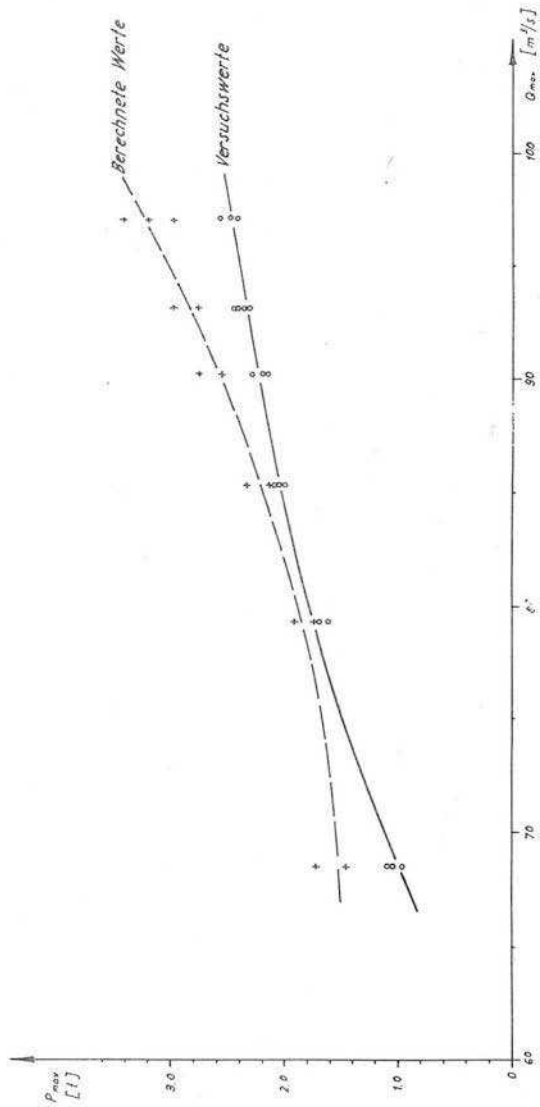


von 65 Tonne

Abb. 73

Maximale Trossenkräfte eines im Oberhafen am ungünstigsten Liegeplatz wartenden Schiffes
aus Berechnungen mittels der Wellenneigung und aus Modellversuchen

Füll- und Entleerungssystem : Variante I



Maximale Trossenkraft eines im Vorhafen wartenden Schiffes
in Abhängigkeit von der Wellenneigung und der Trossenlänge
 nach Partensky [29]

$$P_{\max} = \sqrt{(G_s \cdot J_w - P_0) \cdot E \cdot F_T \left(\frac{s - l_0}{s} \right)}$$

- F_T = 1,75 cm² • metallischer Querschnitt der Trosse
 E = 1100 t/cm² • Elastizitätsmodul der Trosse
 G_s = 1240 t • Bruttoschiffsgewicht
 P_0 = 0,030 t • Trossenkraft in der Ruhelage
 s = Trossenlänge
 l_0 = Sehnennlänge der Trosse in der Ruhelage

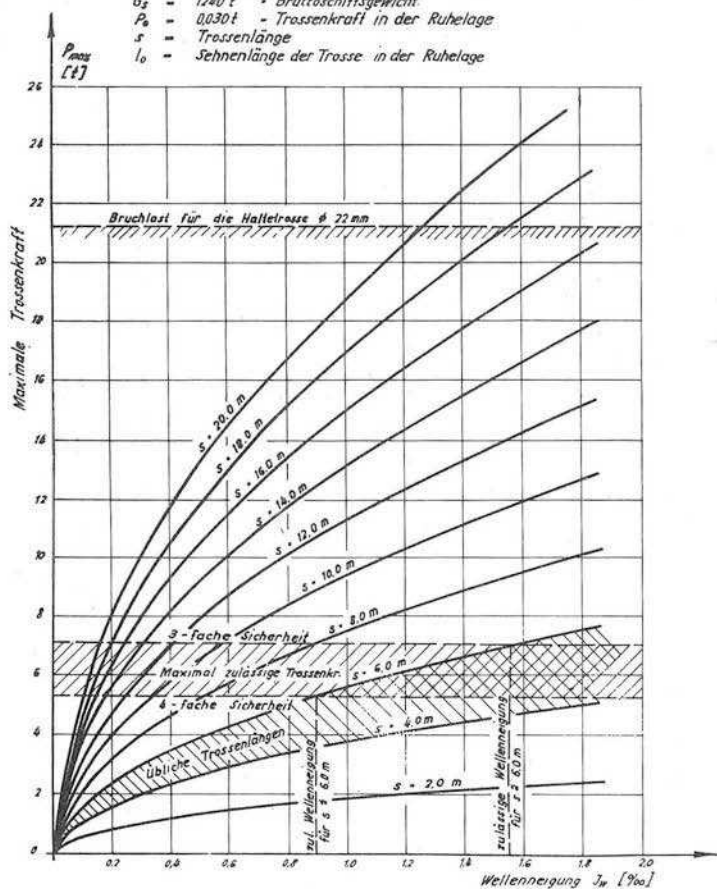


Abb. 74

